

**ECOLE NATIONALE SUPERIEURE
DES MINES DE RABAT**

TECHNIQUES ET METALLURGIE DE SOUDAGE

**Présentation préparée par:
Bennaceur OUAKI, Professeur (ENSMR)**

Assemblages soudés

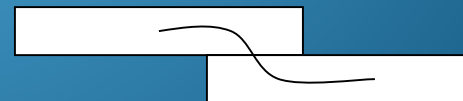
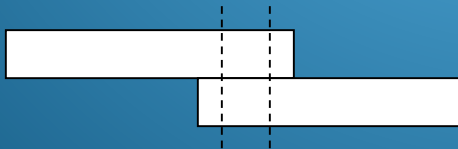
☛ Définitions:

➔ Le soudage = Procédé d'assemblage dans lequel les métaux des pièces assemblées participent directement à la formation du joint

➔ Autres procédés limités:

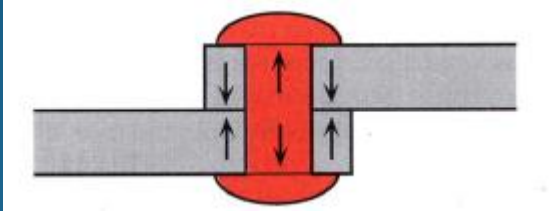
- Vissage
- Rivetage
- Serrage
- Collage...etc

Exemples: Risque de corrosion galvanique Discontinuité de chargement

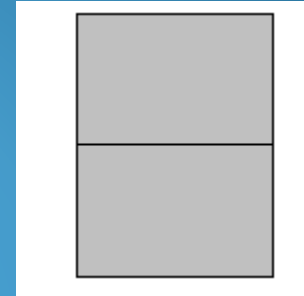


Assemblages soudés

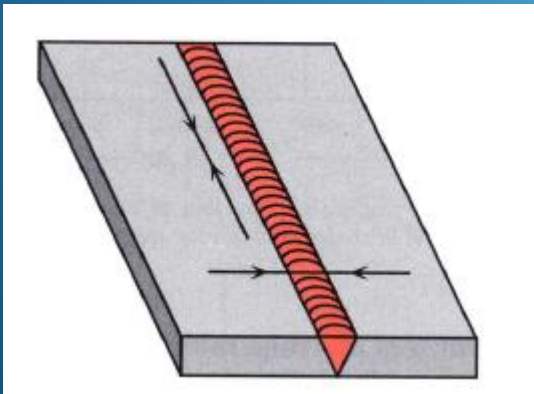
Assemblage mécanique



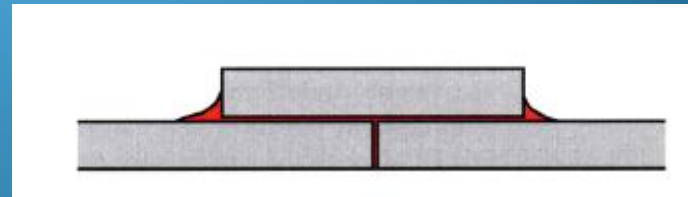
Assemblage par diffusion



Assemblage par soudage



Assemblage par brasage



Assemblages soudés

☛ Positions de soudage:

➔ Positions à plat (ou horizontale):

Bout à bout



En angle intérieur



En angle extérieur



En gouttière



Assemblages soudés

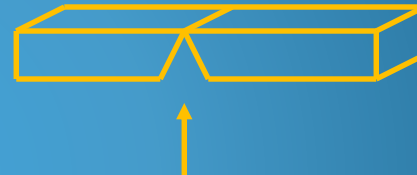
☛ Positions de soudage:

➔ Positions verticales:

Verticale montante
ou descendante



➔ Position au plafond:



➔ Position en corniche

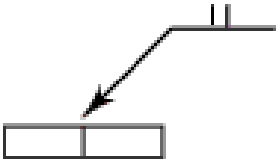
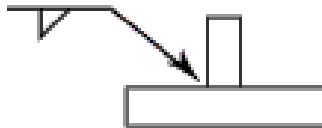
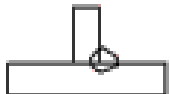
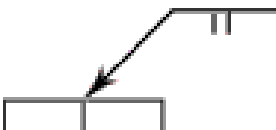
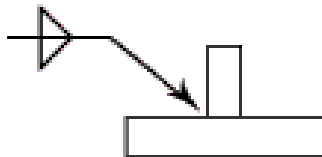
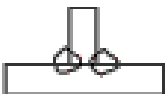
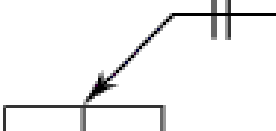
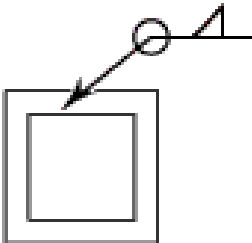
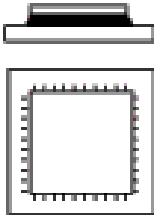
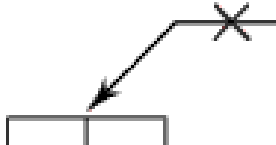
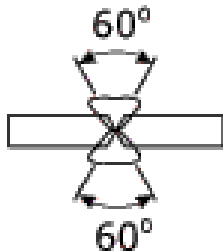
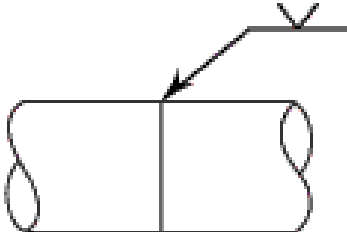
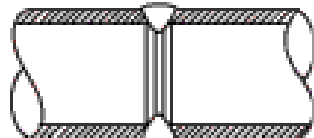


➔ On distingue également

- Demi-montante
- Corniche inclinée
- ...etc

Assemblages soudés

☛ Symboles de soudage de base:

Symbole	Soudure désirée	Symbole	Soudure désirée
			
			
			
			

Classification générale des procédés de soudage

- ➡ Les différents procédés d'assemblage par soudage peuvent être classés en fonction de l'énergie mise en œuvre
 - Énergie thermo-chimique
 - Énergie électro-thermique
 - Énergie mécanique
 - Énergie focalisée

Classification générale des procédés de soudage

➤ Énergie thermo-chimique:

- Soudage aux gaz
- Soudage aluminothermique

➤ Énergie électro-thermique:

A- Soudage par résistance:

- Par points
- A la molette
- Sur bossage
- En bout par résistance pure
- Par étincelage
- Vertical sous laitier
- Par induction

Classification générale des procédés de soudage

➤ Énergie électro-thermique:

B- Soudage A l'arc électrique:

- Manuel avec électrodes enrobées
- Sous protection gazeuse (TIG, MIG et MAG)
- A l'arc sous flux
- Autres:
 - ✓ Au plasma d'arc
 - ✓ A H₂ atomique
 - ✓ En moule sous gaz
 - ✓ A l'arc tournant

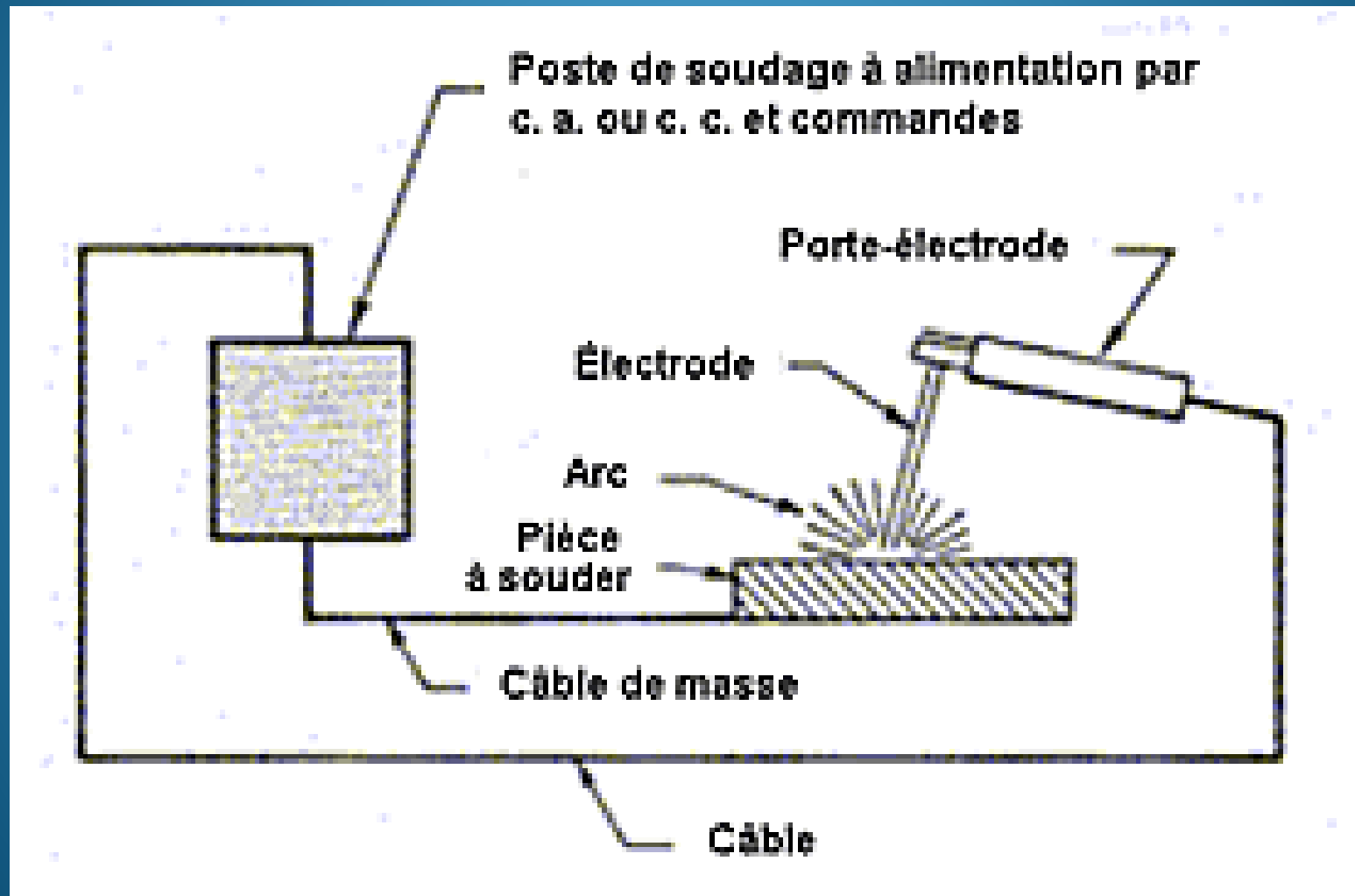
➤ Énergie mécanique:

- Par friction
- Par explosion
- Aux ultra-sons
- A froid

➤ Énergie focalisée: Par bombardement électronique

Description des phénomènes d'arc électrique

➔ Exemple de génération d'un arc électrique:



Description des phénomènes d'arc électrique

➔ Principe

➔ L'arc électrique dépend :

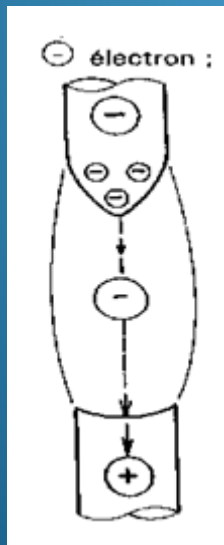
- Différence de potentiel entre deux électrodes
- L'émissivité du matériau
- La forme de la cathode
- Le potentiel ionisant des gaz

Description des phénomènes d'arc électrique

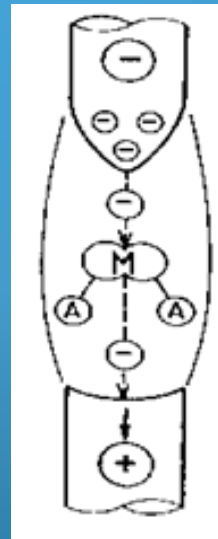
➔ L'arc électrique est la matérialisation du passage du courant dans les gaz

➔ Dans l'atmosphère de l'arc on distingue:

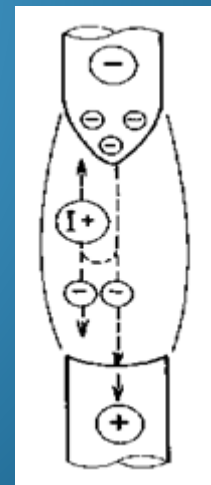
- Des électrons libres
- Des atomes
- Des ions positifs et négatifs
- Des molécules



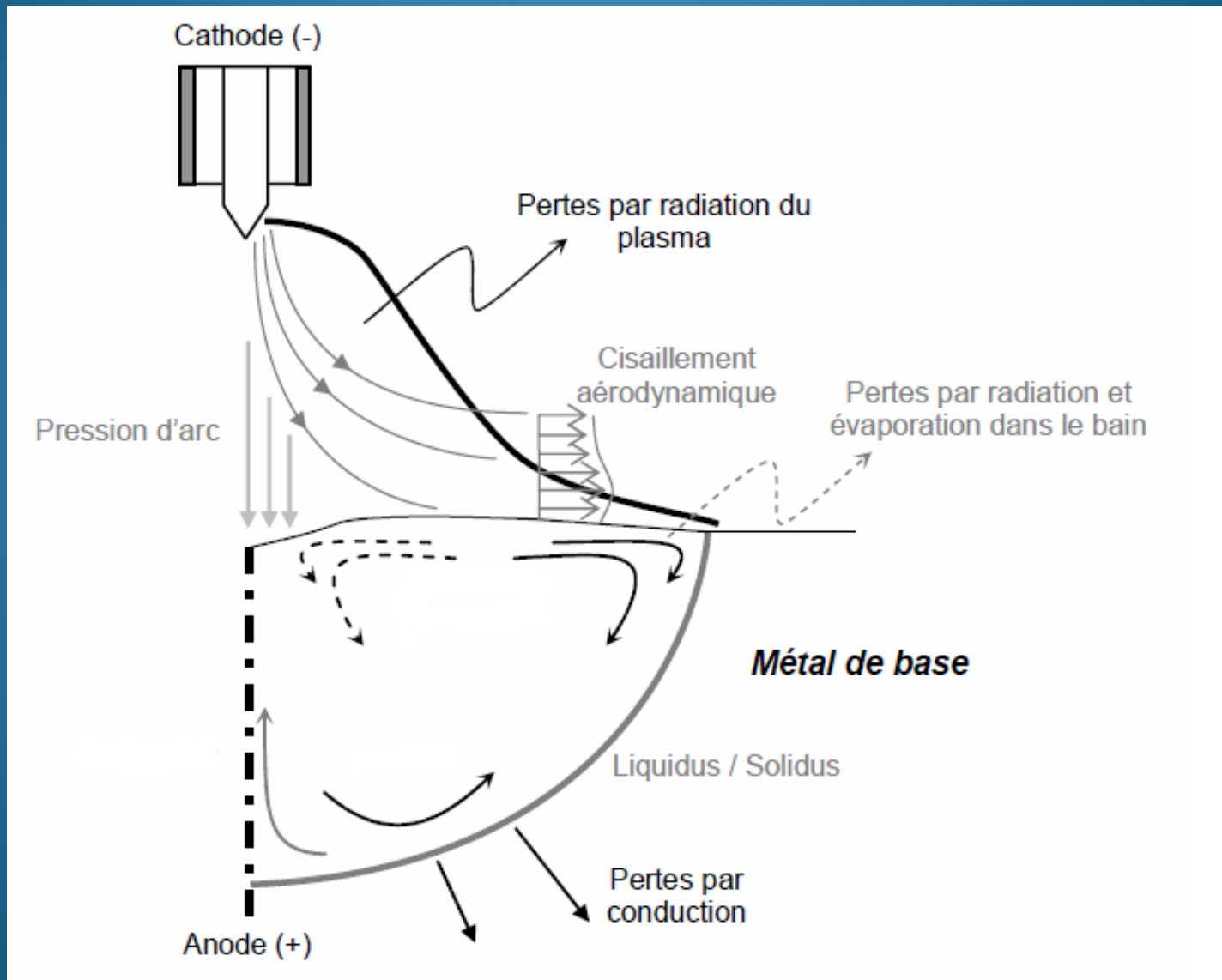
Bombardement de l'anode par les e-



Dissociation des molécules

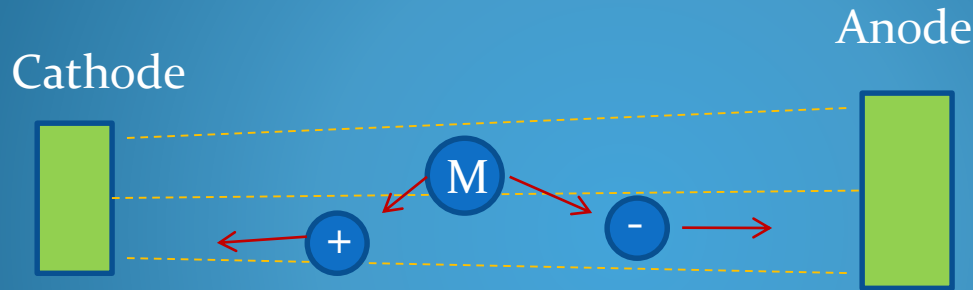


Description des phénomènes d'arc électrique



Description des phénomènes d'arc électrique

Entre les extrémités de deux électrodes, un arc électrique peut être amorcé et persister



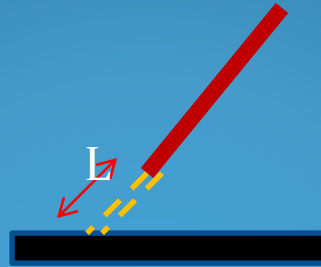
Observation de l'arc:

- Tâche brillante au niveau de la cathode
- Tâche d'un plus grand éclat au niveau de l'anode
- Colonne gazeuse à haute température dans la colonne d'arc

Description des phénomènes d'arc électrique

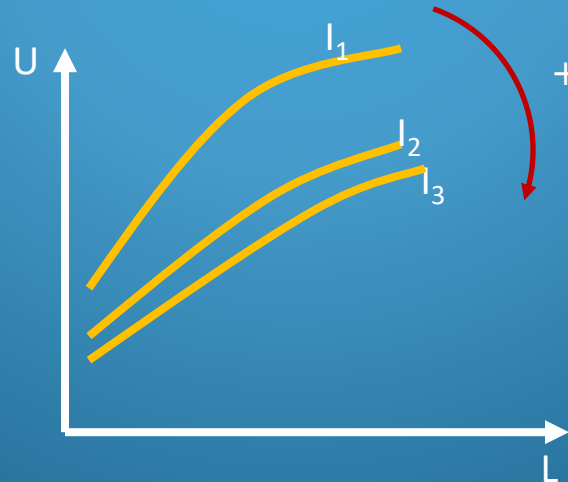
➡ Évolution de la tension à l'arc en fonction de la longueur d'arc:

➡ Arc électrique:



➡ Paramètres: **L**, **I** et **U**

➡ $U = f(L)$

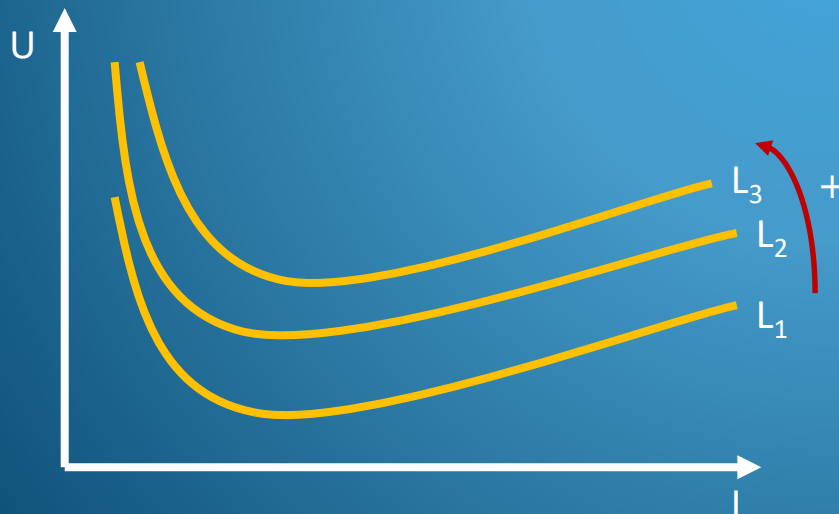


Description des phénomènes d'arc électrique

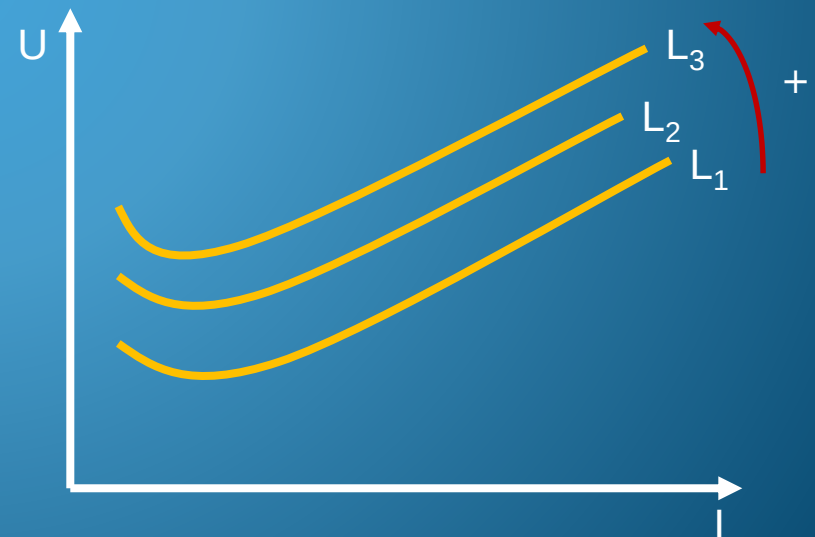
➡ Évolution de la tension à l'arc en fonction de l'intensité de courant:

➡ On envisage en général deux cas:

Cas des densités de courant faibles
(10-20A/mm²)



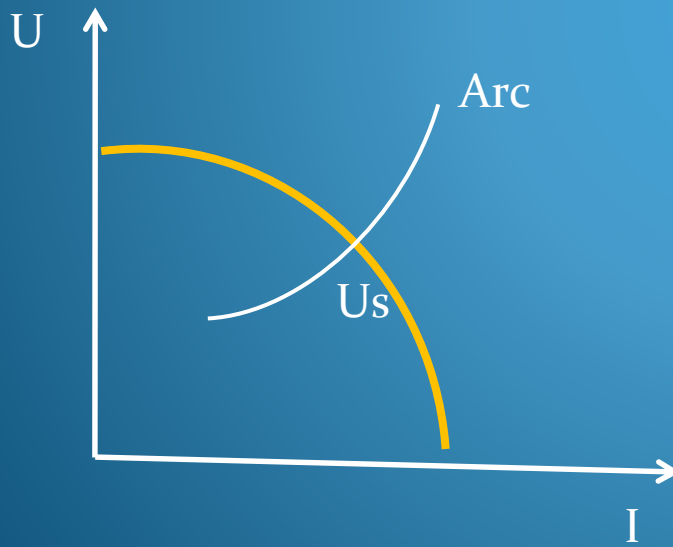
Cas des densités de courant élevées
(50-200A/mm²)



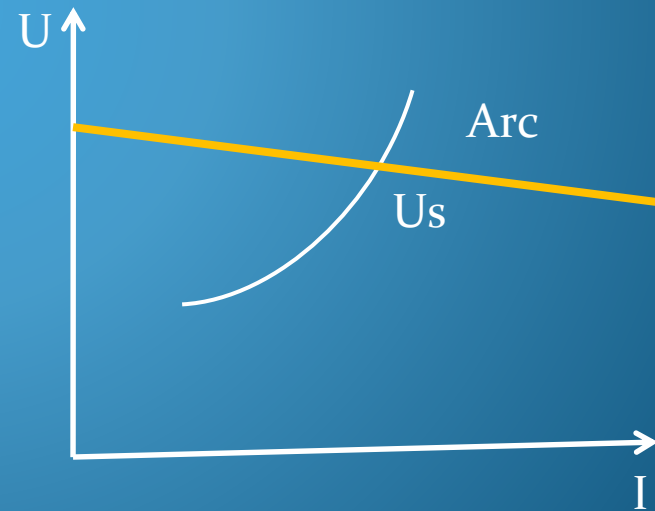
Générateurs de courant

➡ Deux types de caractéristiques sont en général utilisées:

Caractéristique plongeante



Caractéristique horizontale



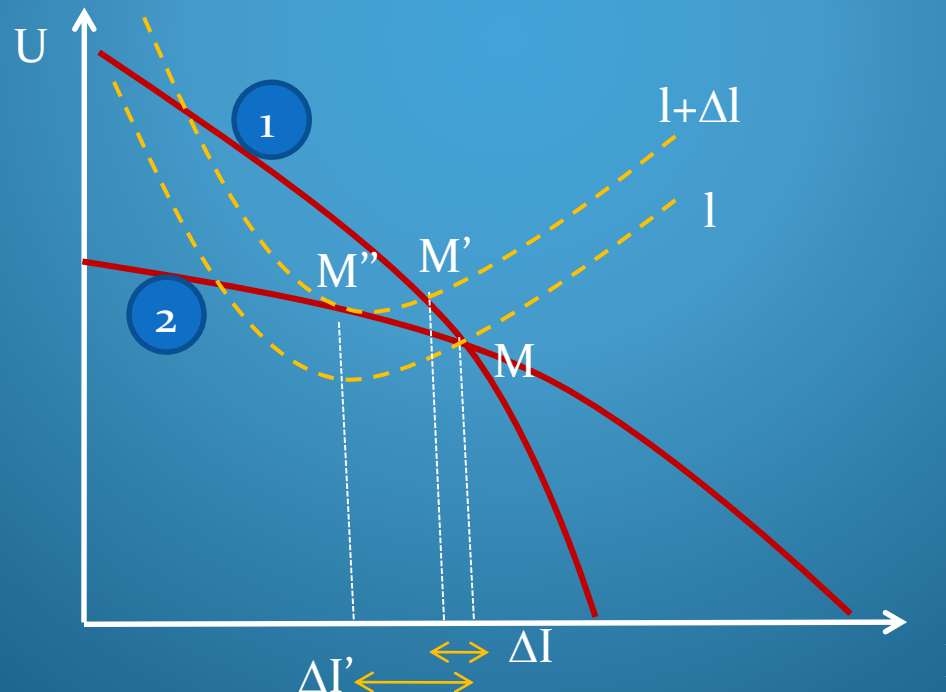
➡ Courant: Continu ou alternatif

Générateurs de courant

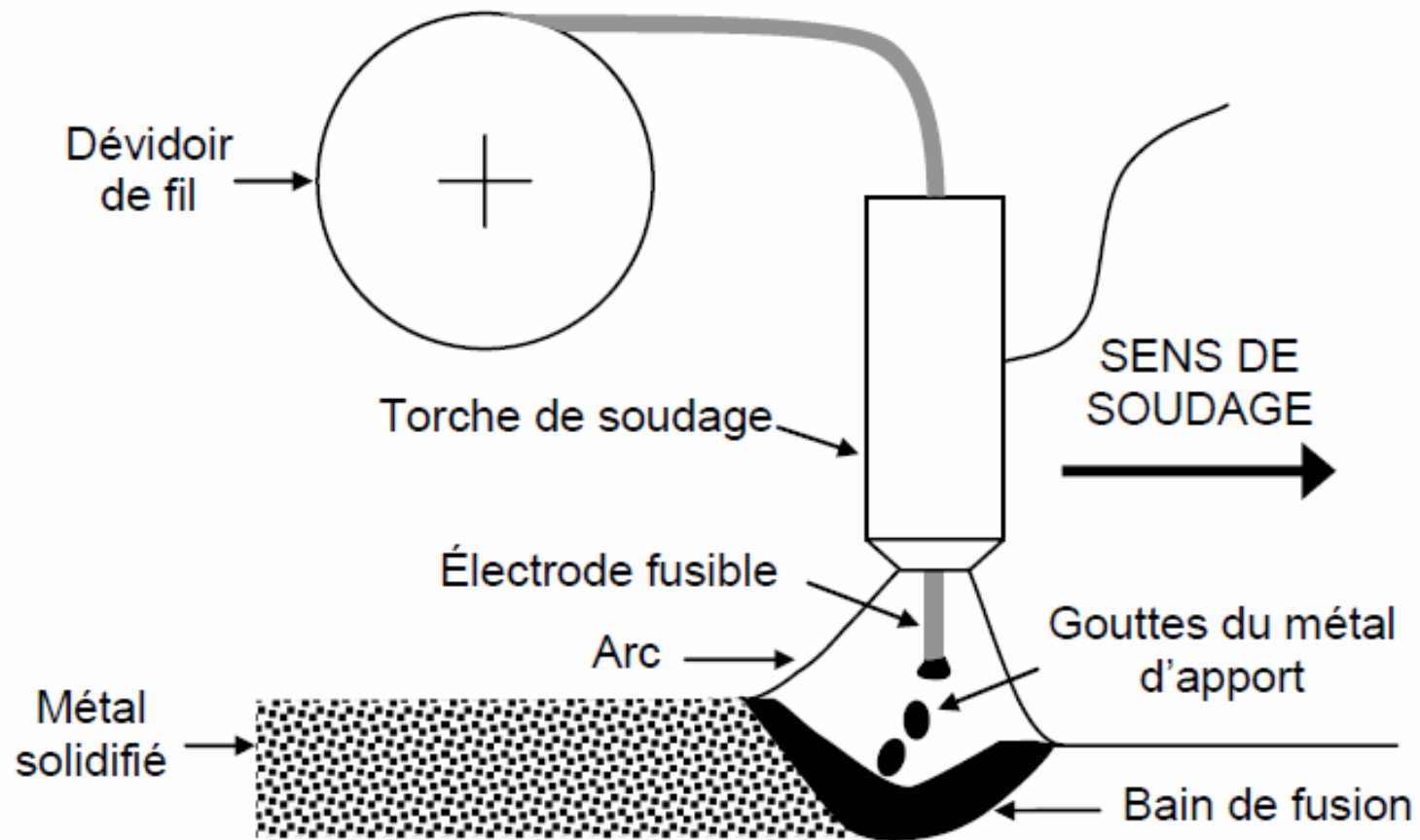
➡ En soudage automatique ou semi-automatique:

⇒ Choix de la caractéristique pour l'autorégulation

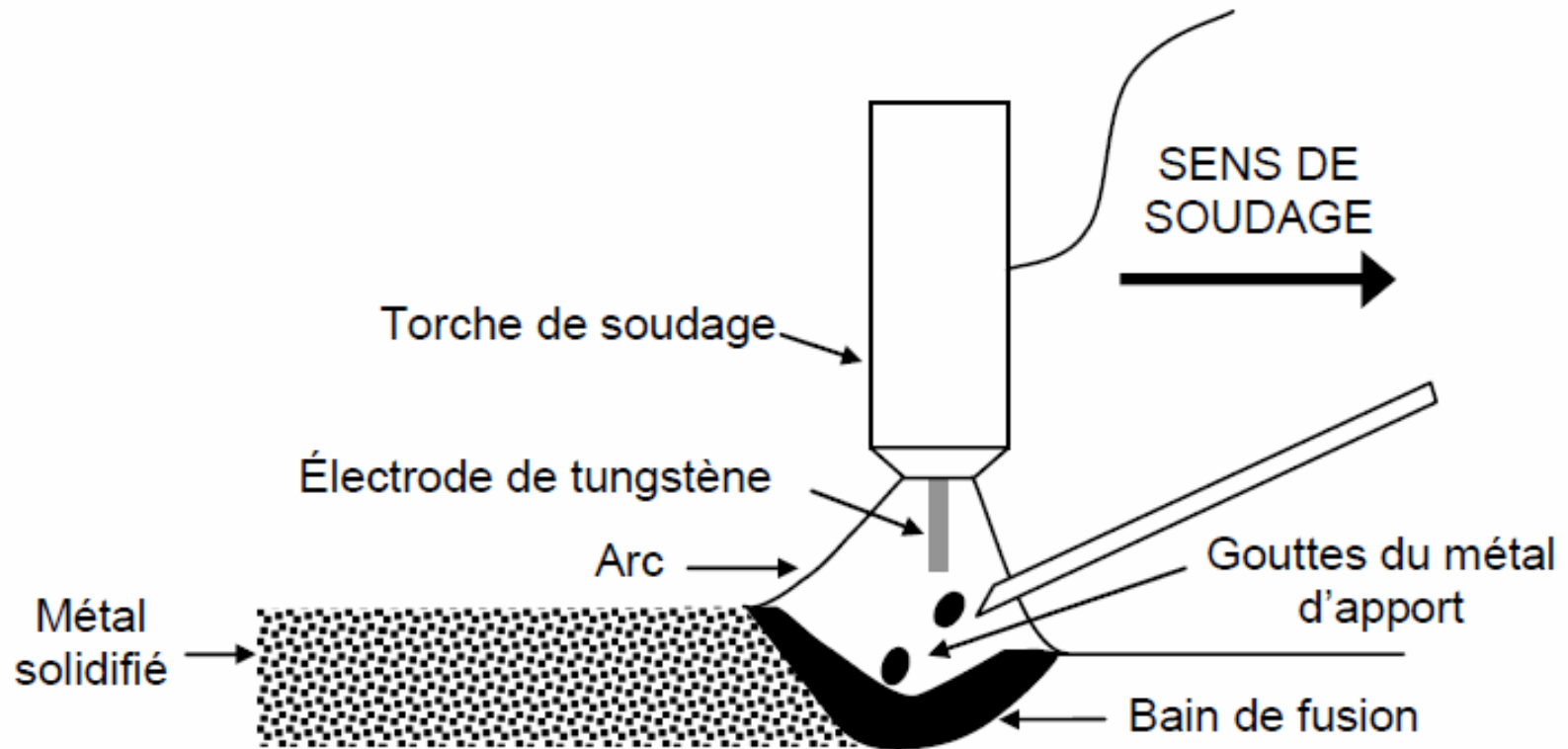
➡ Exemple:

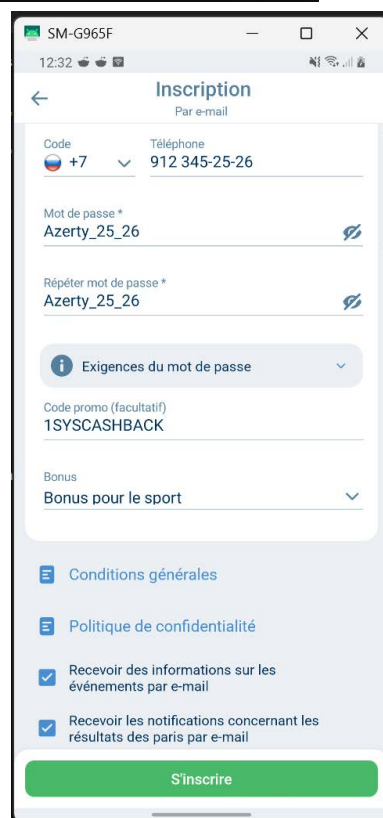
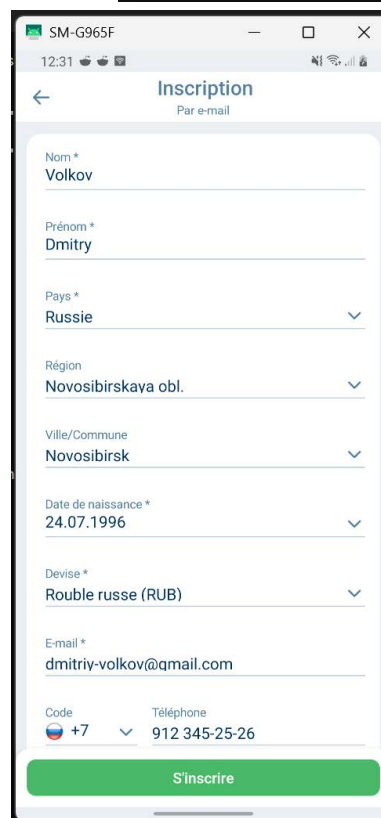
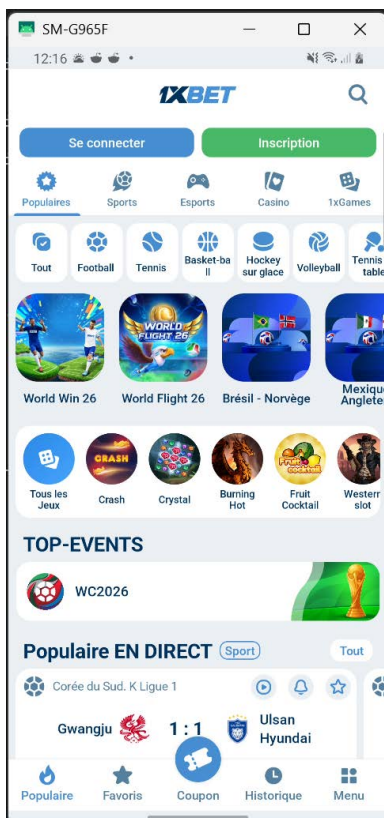
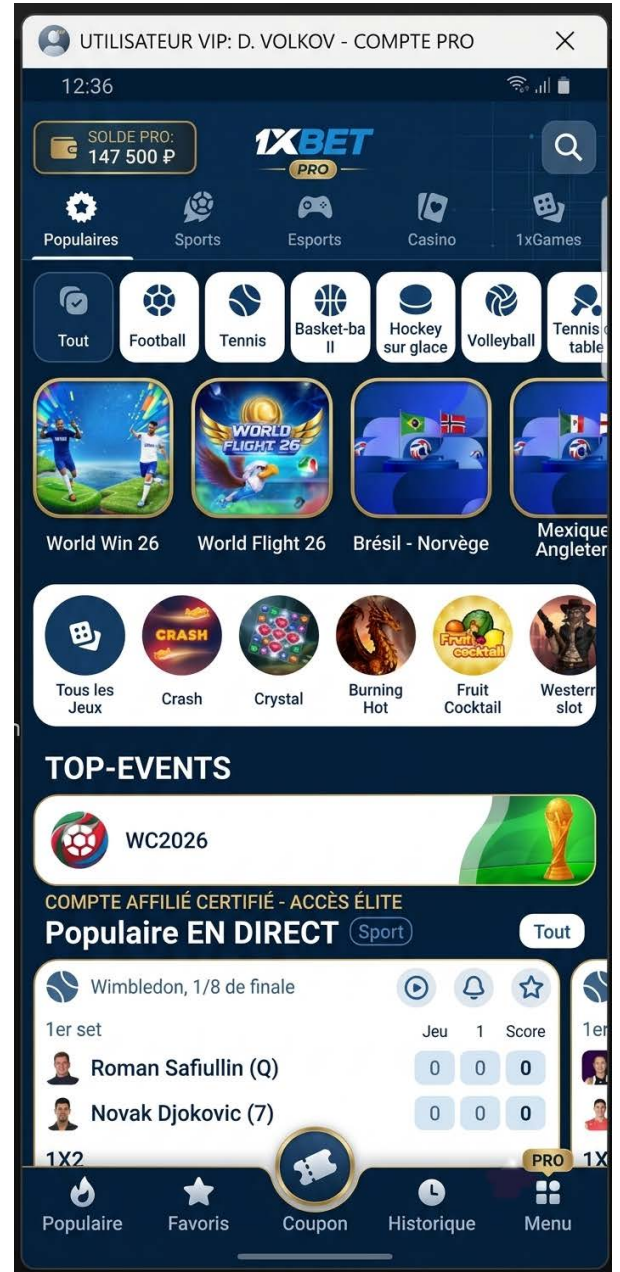
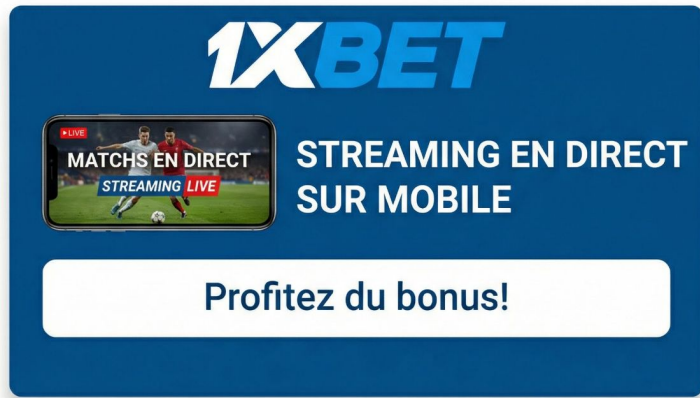


Procédé semi-automatique MIG et MAG



Procédé TIG





Les gaz de protection

☞ Gaz pour TIG:

➔ Ar pur:

- Pureté: 99.995% pour le soudage de qualité supérieure de l'AL et ses alliages
- Pureté: 99.99% pour le soudage des aciers inox, du Cu et des alliages légers

➔ Ar+He:

- Contribue à une meilleure stabilité de l'arc
- Améliore la pénétration pour le soudage des aciers inox
- Permet une grande vitesse en soudage automatique

➔ Ar+He+H₂:

- Le mélange augmente la tension de l'arc
- Permet une grande vitesse de soudage

Les gaz de protection

☛ Gaz pour MIG et MAG

➔ L'Argon pur ou mélangé avec l'He est souvent utilisé
Pour le soudage de l'Aluminium, du cuivre et alliages.

➔ Les mélanges les plus souvent utilisés sont:

➤ Ar+O₂ à 1 à 2%

➤ Ar+CO₂ à 25%

➤ Ar+O₂ +CO₂ (Ar+5%O₂+15%CO₂)

Transfert du métal dans l'arc électrique

- ☛ Dans la plupart des procédés de soudage à l'arc
 - ⇒ Le métal d'apport est fourni par une électrode fusible
- ➔ Les gouttes du métal transitent de l'électrode vers le bain en fusion
- ➔ Les gouttes sont soumises à plusieurs forces dues à:
 - Tension superficielle
 - Pesanteur
 - Pincement électromagnétique
 - Jet de plasma
 - Eruption gazeuses

Transfert du métal dans l'arc électrique

➡ Les différents modes de transfert:

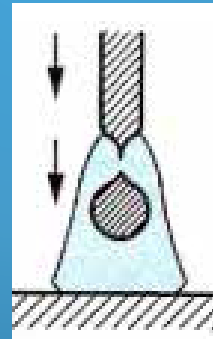
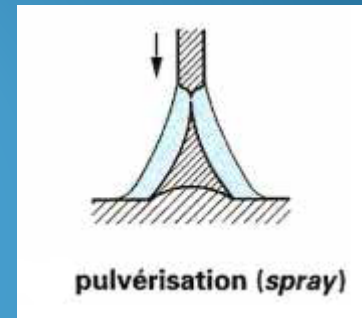
➡ On distingue:

➤ Transfert par pulvérisation

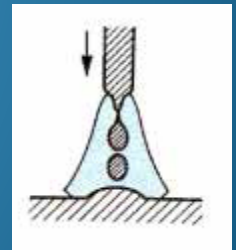
➤ Transfert par pulvérisation axiale

➤ Transfert globulaire

➤ Transfert par court-circuit



Ou gouttelettes fines



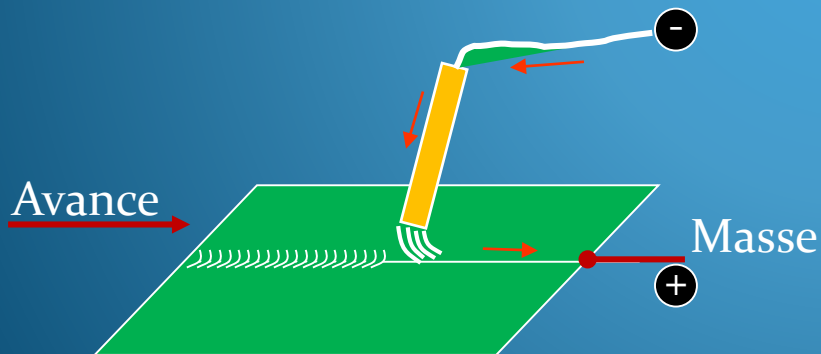
Soufflage magnétique

➡ Phénomène dû au passage du courant dans l'électrode, l'arc, la pièce et la masse.

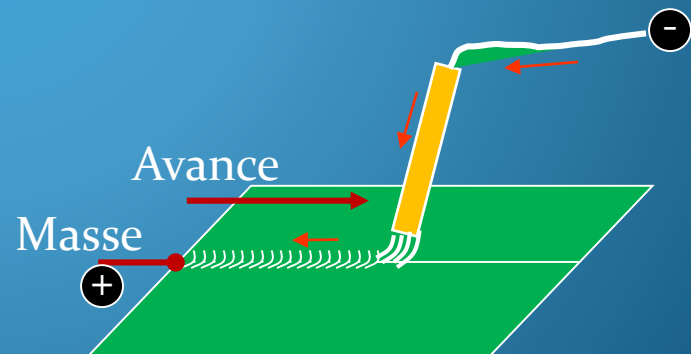
➡ Sa présence :

- Gène le soudeur,
- Compromet la régularité du cordon
- Nuit à la qualité.

➡ Exemples:



Courant de sens contraire : l'arc est repoussé



Courant de même sens : l'arc est attiré

Energie de soudage

☛ Énergie nominale :

➔ C'est l'énergie fournie au niveau du bain de fusion donnée par:

$$E_n = \frac{60 \cdot U \cdot I}{1000 \cdot v}$$

E_n (K J/cm)

Où:

U: Tension de soudage (V)

I: Intensité de soudage (A)

V: La vitesse d'avance (cm/mn)

☛ Énergie Equivalente : $E_q = E_n \cdot \eta \cdot k$

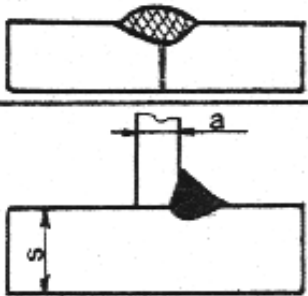
➔ C'est l'énergie réellement absorbée par la pièce

➔ Elle est obtenue par correction de E_n en fonction de :

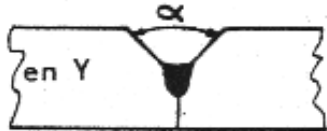
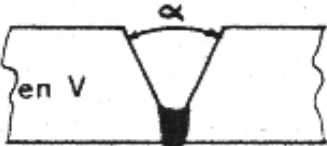
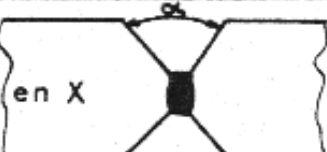
➤ Du procédé de soudage : facteur η

➤ De la forme et du type de joint : facteur k

Coefficients de correction du chanfreinage

	$\frac{a}{s}$	0	0,25	0,5	0,75	1
	k	1	0,97	0,89	0,78	0,67

avec chanfrein

forme	α	60°	75°	90°	105°
 en Y	k	0,60	0,63	0,67	0,70
 en V	k	1,50	1,72	2	2,38
 en X	k	0,75	0,85	1	1,20

Influence des paramètres de soudage

☛ Énergie: E

- Paramètres: U , I et v_s

- Influent sur les propriétés mécaniques (ductilité, résilience, ...etc)
- E ne doit pas être trop élevée ni trop faible
- Pour les aciers: $20 \leq E \leq 35 \text{ KJ/cm}$

➔ Tension à l'arc:

- Influence sur la largeur du dépôt (Si $U \nearrow \Rightarrow$ largeur $\nearrow$)
- Influence sur le régime de transfert du métal pour un gaz de protection donné

Influence des paramètres de soudage

→ Intensité du courant:

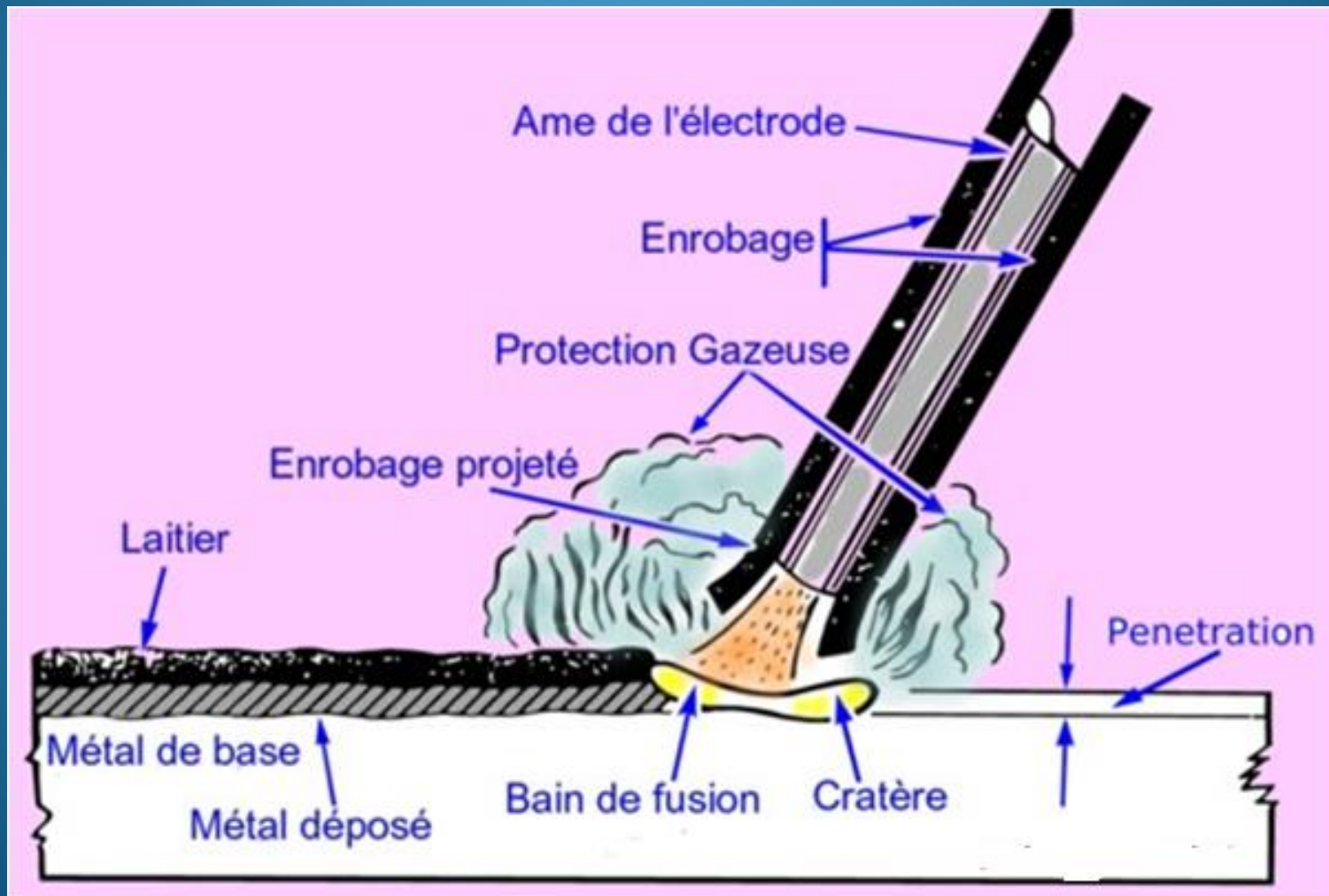
- La pénétration est proportionnelle au courant de soudage et est liée à la vitesse de fusion du fil-électrode
- L'intensité présente peu d'influence sur la largeur du cordon

→ Fil électrode:

- Influence sur la pénétration en soudage automatique ou semi-automatique
- Pour U , I et v_s constants:
Si ϕ diminue $\Rightarrow$ pénétration augmente

Soudage à l'arc avec électrodes enrobées

→ Principe:



Soudage à l'arc avec électrodes enrobées

➔ L'électrode enrobée est constituée de:

- ▶ Âme métallique
- ▶ Enrobage

☞ Âme métallique:

- Sert de conducteur électrique et constitue principalement le métal d'apport
- Sa nature est fonction des matériaux à souder

☞ Enrobage:

- Protège le bain de fusion et est composé de:
 - Produits de support: Rutile, carbonates de chaux, ...etc
 - Produits actifs: Ferro-alliages
 - Liants: Silicates en général

Electrodes enrobées

☛ Rôles de l'enrobage:

⇒ 3 rôles: électrique, métallurgique et mécanique

➔ Rôle électrique:

➤ La présence des silicates

⇒ facilite l'amorçage (action ionisante)

➤ Chaque type d'électrode possède un potentiel d'ionisation donné

➤ Sous faibles tensions à vide, l'enrobage permet d'assurer la continuité de l'arc

Electrodes enrobées

➔ Rôle métallurgique:

- Protection du bain de fusion par la formation d'un laitier
(Protection contre l'oxydation et la nitruration)
- Isolation thermique du métal fondu:
 - Le laitier évite le joint de se refroidir rapidement
 - Le laitier permet aux gaz emprisonnés de se libérer sans créer de soufflures
- Compensation des pertes d'éléments

➔ Rôle mécanique:

Comme T_f de l'âme est $< T_f$ de l'enrobage $\Rightarrow$ création d'un cratère

$\Rightarrow$ Stabilité mécanique de l'arc

Enrobages enrobées

☛ On distingue différents types d'enrobages:

➔ Enrobage rutile:

- Produit de support: TiO_2 avec faible proportion de cellulose
- Electrode d'emploi général (CC ou CA)

➔ Enrobage volatil ou cellulosique:

- Il est de type rutile mais fortement chargé en cellulose
- La présence de cellulose
 - ⇒ Atmosphère réductrice par combustion dans l'arc

Enrobages des électrodes

➔ Enrobage acide et oxydant:

- Formé à base de silicates de K (A) et de l'oxyde de fer (O)
- Augmentation de la stabilité de l'arc

➔ Enrobage basique:

- A base de carbonate de chaux et de fluorure de calcium
- La laitier calcaire ➡ excellent désulfurant
- Meilleures caractéristiques mécaniques (Résilience)

➔ Enrobages spéciaux:

- Ils sont souvent du type basique
- Chaque type correspond à une nuance particulière

Désignation des électrodes

Symb	Charge de rupture R mini en MPa	Limite élastique Re mini en MPa
E 43	430-510	320
E 51	510-610	360

Symbole	Type d'enrobage
A	Acide (oxyde de fer)
AR	Acide (rutile)
B	Basique
C	Cellulosique
O	Oxydant
R	Rutile (enrobage semi-épais)
RR	Rutile (très épais)
S	Autres types

Rendement
(si > 105 %) arrondi
aux 10 % les plus
proches

Teneur en hydrogène diffusible
H si 5 < teneur en ml/100 g < 10
BH si teneur en ml/100 g ≤ 5

E

51

3 / 3

B

190

3

6

H

Symbole général

Symb	Allongement mini %		Énergie d'impact Temp °C pour 28 J mini Valeur mini. ≥ 16 J
	E43	E51	
0			
1	20	18	+ 20
2	22	20	0
3	24	22	- 20
4	24	22	- 30
5	24	22	- 40

Symb	Position de soudage
1	Toutes positions
2	Toutes positions, sauf verticale descendante
3	À plat, en gouttière, en angle à plat
4	À plat, en gouttière
5	Verticale descendante

Symb	Énergie d'impact Temp °C pour 28 J mini Valeur mini. ≥ 16 J
0	
1	+ 20
2	0
3	- 20
4	- 30
5	- 40

Polarité à l'électrode	Courant de soudage				
	CC uniquement	CC et CA tension à vide minimale (CA)			
		50	70	90	
+ ou -	-	1	4	7	
-	-	2	5	8	
+	0	3	6	9	

Les électrodes sont repérées de 0 à 9.

CC = Courant Continu

CA = Courant Alternatif.

Influence des éléments

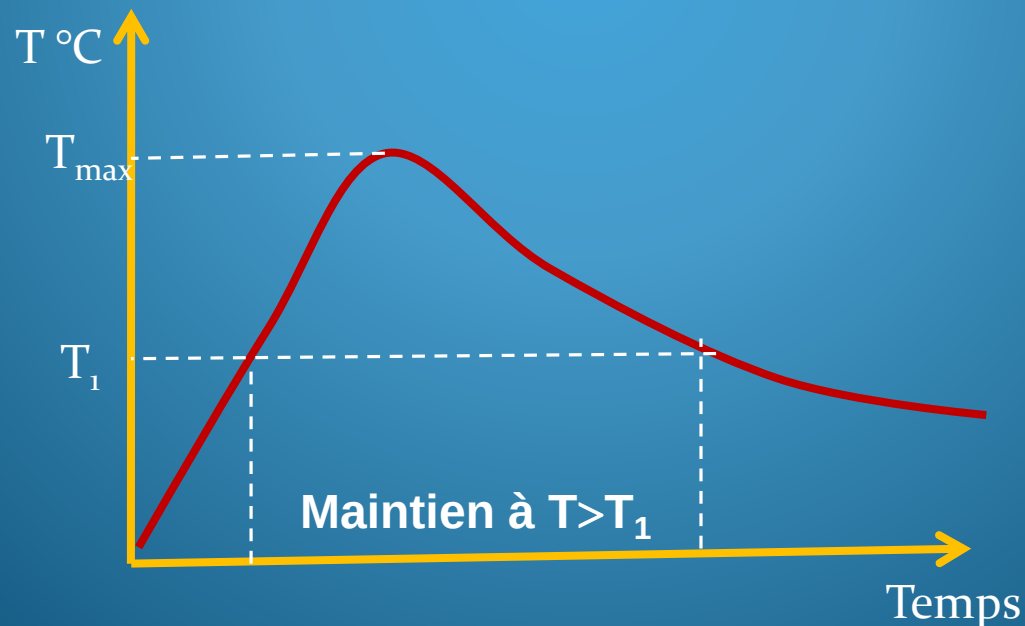
- **Carbone**: Accroît la résistance à la rupture et à la dureté mais favorise la trempe de l'acier dans la zone de la soudure
- **Manganèse**: Donne à l'acier une forte résistance à l'usure et aux chocs
- **Chrome**: Élément trempant très actif. Augmente la résistance à la rupture. A des teneurs supérieures à 1% et associé au carbone, le soudage devient très délicat par formation des carbures de chrome au niveau des joints
- **Nickel**: Améliore les propriétés de l'acier, il est utilisé dans les aciers Travaillant à basse température et dans les aciers inoxydables
- **Molybdène**: Diminue la fragilité, accroît la résistance à chaud, améliore la résistance à la corrosion dans les aciers inoxydables
- **Cuivre**: Améliore la résistance à la corrosion surtout dans le milieu marin, on le trouve dans certains aciers inoxydables ou des aciers à haute limite élastique

Cycles thermiques de soudage

☛ **Définition:** Loi selon laquelle la température varie en un point de la pièce en fonction du temps

➔ Lorsque la source de chaleur se déplace le long des bords à souder

⇒ Le matériau environnant s'échauffe, atteint une température maximale puis se refroidit

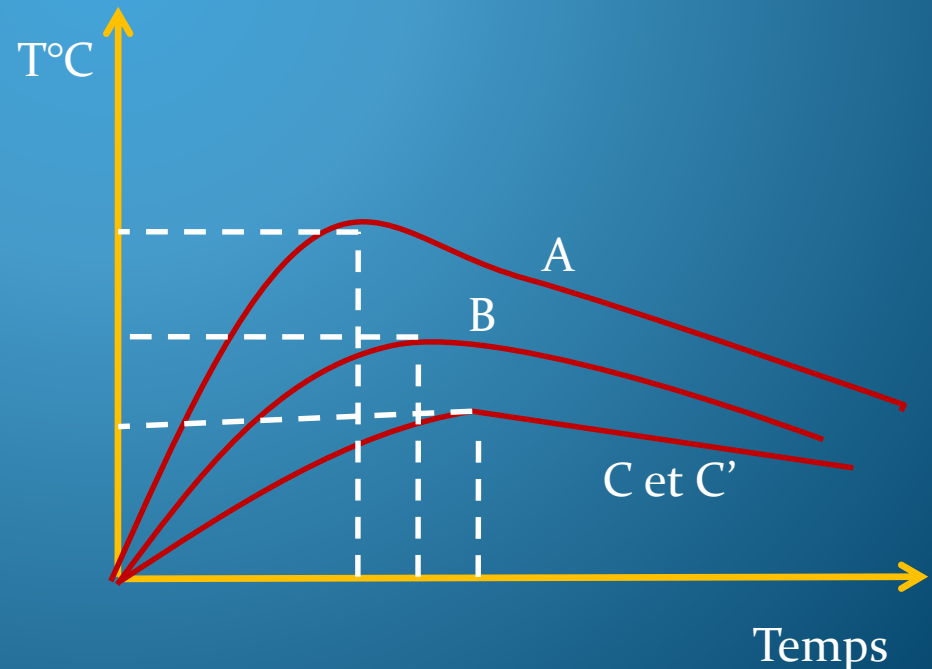
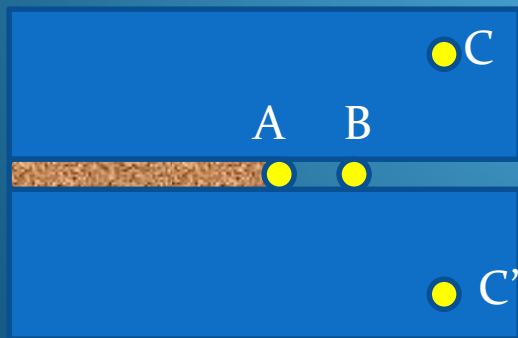


Cycles thermiques de soudage

➡ Les cycles thermiques dépendent de:

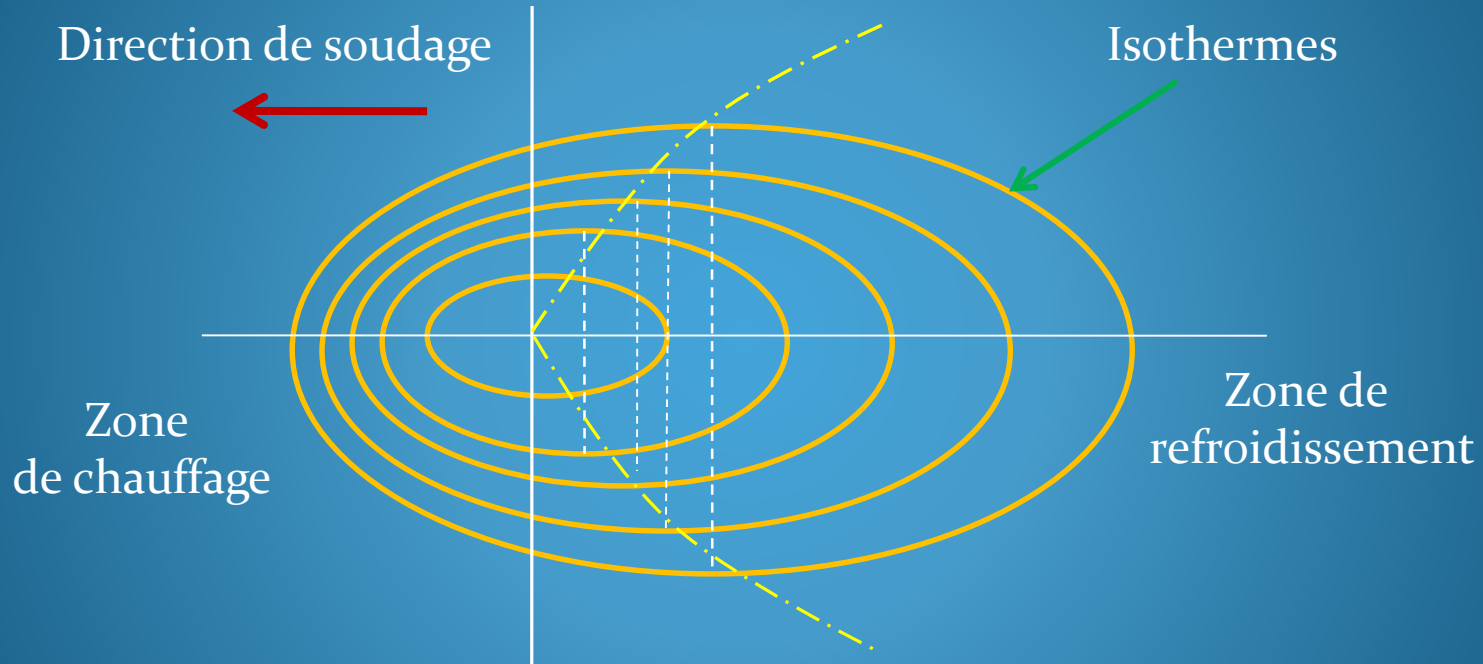
- Position et distance du point considéré par rapport à la ligne de soudure
- Procédé utilisé
- Epaisseur des pièces
- Température initiale des pièces

1- Influence de la position du point:



Cycles thermiques de soudage

- ➡ En 2D, la distribution de la température à un instant donné est définie par des isothermes telles que:



- ➡ Chaque isotherme= ellipse dont le petit axe est d'autant plus déplacé vers l'arrière que la température est plus faible
- ➡ En 3D, on définit un « Solide thermique »

Cycles thermiques de soudage

2- Influence du procédé:

- ➔ Paramètre: Apport thermique
- ➔ Exemple: Procédé à l'arc $Q=UI/v_s$
- ➔ Plus Q est élevée $\Rightarrow$ Plus le refroidissement est plus lent
(La quantité de chaleur que le joint doit évacuer est plus importante)

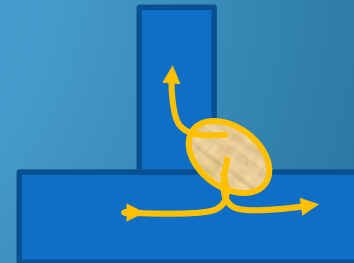
3- Influence de l'épaisseur:

- ➔ La chaleur introduite s'élimine principalement par conduction
- ➔ Plus l'épaisseur est plus forte
 $\Rightarrow$ plus le cycle thermique est plus sévère

Cycles thermiques de soudage

3- Influence de l'épaisseur: (suite)

→ Exemple: Doubler l'épaisseur c'est doubler la vitesse de refroidissement



Cycles thermiques de soudage

4- Influence du matériau:

- ➔ Paramètres: Conductivités thermique et chaleur spécifique
- ➔ Pour toutes autres conditions égales, la vitesse de refroidissement est proportionnelle à ces deux paramètres

5- Influence de la température des pièces:

- ➔ Paramètres: Température initiale
- ➔ Plus la température initiale (T_i) des pièces est élevée
⇒ Plus le refroidissement est lent

Cycles thermiques de soudage

5- Influence de la température des pièces: (suite)

➔ Exemples:

☞ Si T_i passe de 20°C à 150°C

⇒ La vitesse de refroidissement V_r diminue de 1/2

☞ Si T_i passe de 20°C à 200°C

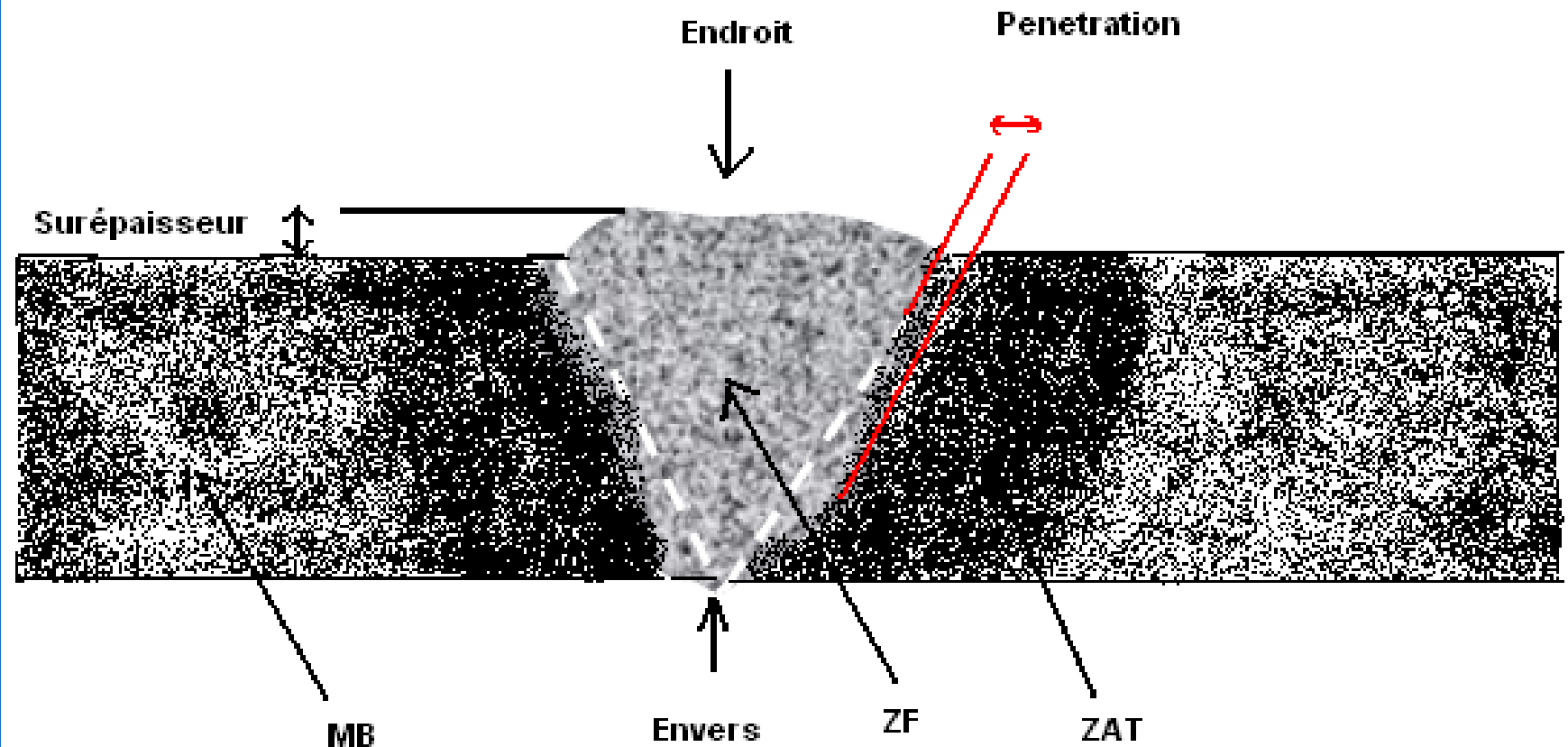
⇒ La vitesse de refroidissement V_r diminue de 1/3

⇒ Intérêt de faire des préchauffages pour atténuer la sévérité des cycles thermiques

➔ Exemple: Hiver ⇒ Cycles plus sévères qu'en été

Aspects métallurgiques

- Examen métallographique d'une section polie et attaquée:



Aspects métallurgiques

☛ L'examen de la transversale du joint soudé permet de distinguer 3 zones:

➔ Zone fondue: **ZF**

C'est la zone où tous les points ont dépassé la température T_f de fusion.

➔ Zone affectée thermiquement : **ZAT**

C'est la zone du métal ayant subi sous l'action de la chaleur des transformations à l'état solide avec changement de microstructure

➔ Métal de base: **MB**

C'est la zone suffisamment éloignée de ZF où la température atteinte n'a pas provoquée de modifications

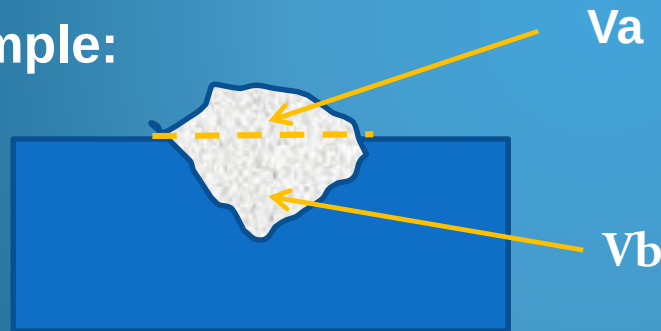
Aspects métallurgiques

➤ Zone fondue:

➔ Elle se forme en vertu du rapport de dilution « d » défini par:

$$d\% = \frac{V_{MB\ fondue}}{V_{ZF}} \cdot 100$$

➔ Exemple:



$$d\% = \frac{V_b}{V_a + V_b} \cdot 100$$

➔ Application: MB: 5%Cr, MA: 25%Cr, d%=30

➔ Le %Cr dans ZF est tel que: $\%Cr = \frac{5.30 + 25.70}{100} = 19\%$

Aspects métallurgiques

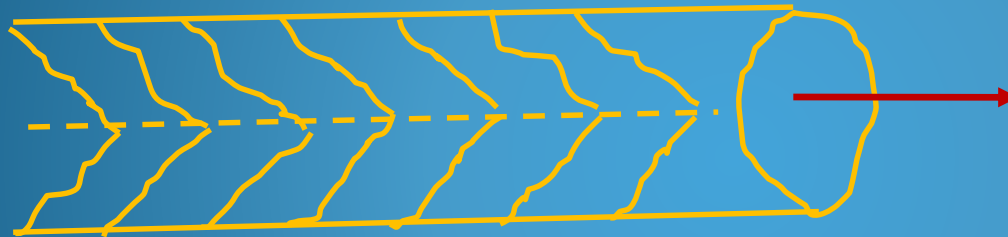
➤ Structure de solidification de ZF:

- ➔ La solidification du bain est analogue à celle d'un lingot en fonderie
- ➔ Elle débute par des grains (Austénitique) qui se développent progressivement en s'allongeant vers le centre
 - ⇒ Formation d'une structure dendritique
- ➔ L'orientation des dendrites suit la direction de refroidissement

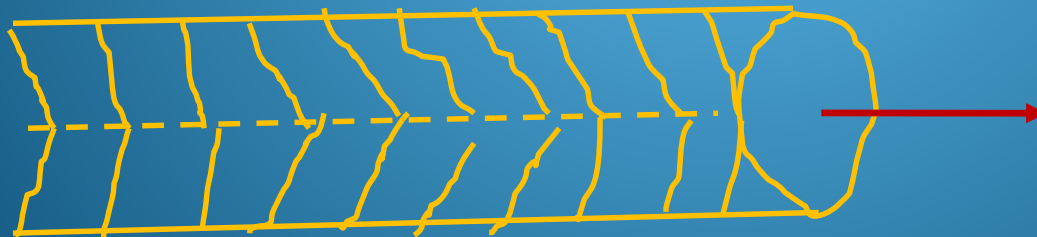
Aspects métallurgiques

➤ Structure de solidification de ZF:

➔ Influence de la vitesse de soudage:



Vr faible

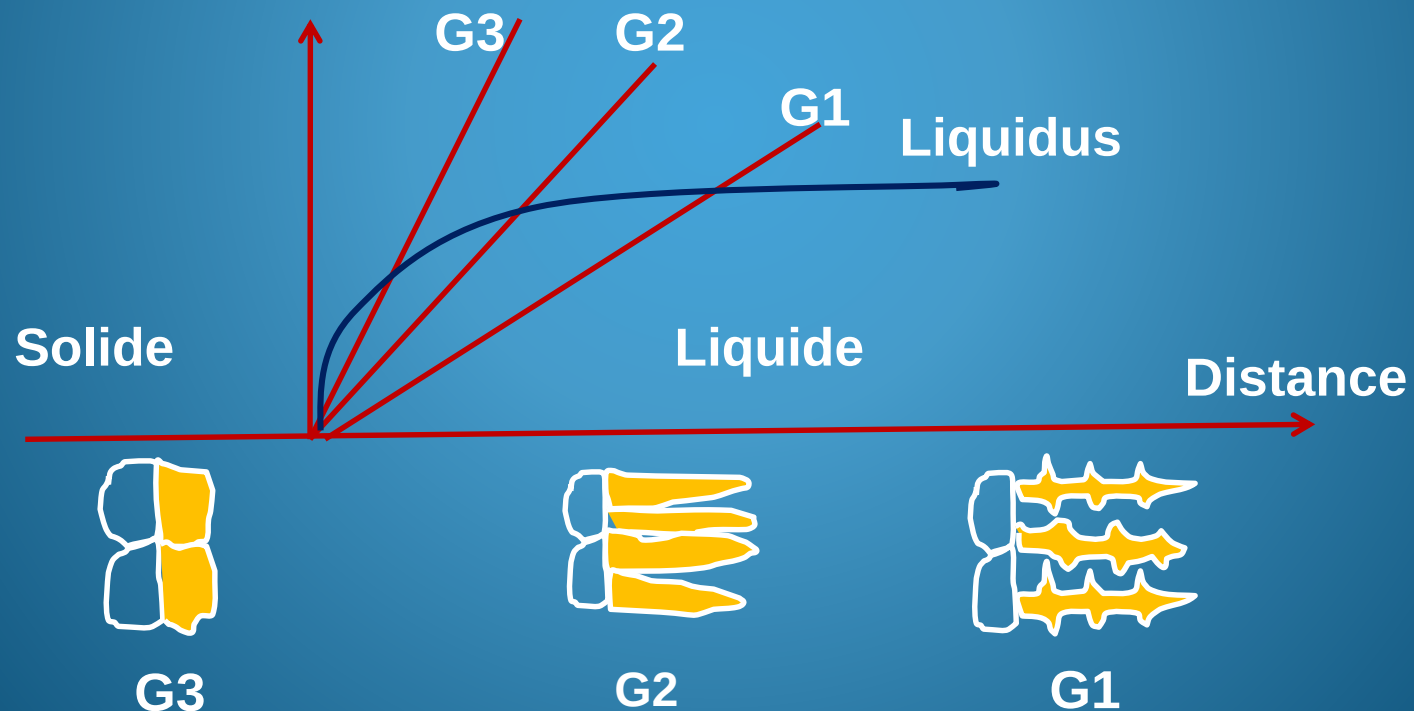


Vr élevée

Aspects métallurgiques

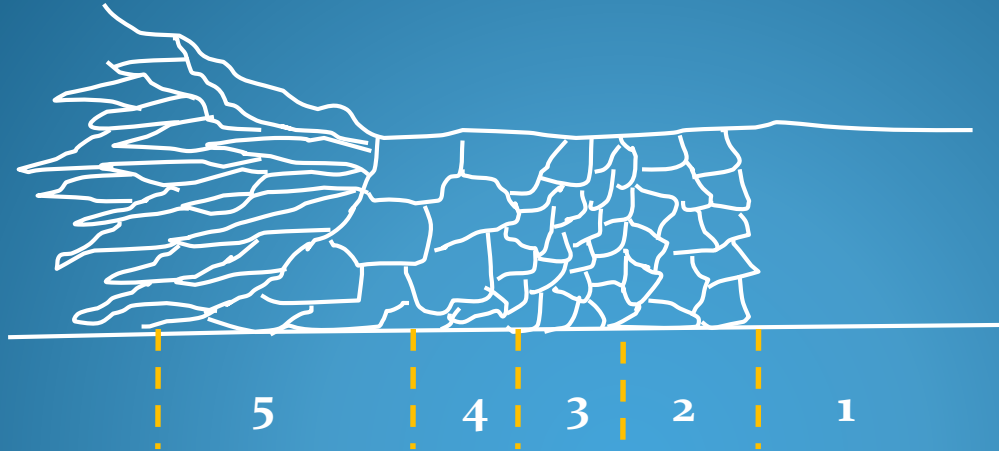
➤ Structure de solidification de ZF:

➔ En fonction du gradient de température, les grains formés prennent différentes configurations:



Aspects métallurgiques

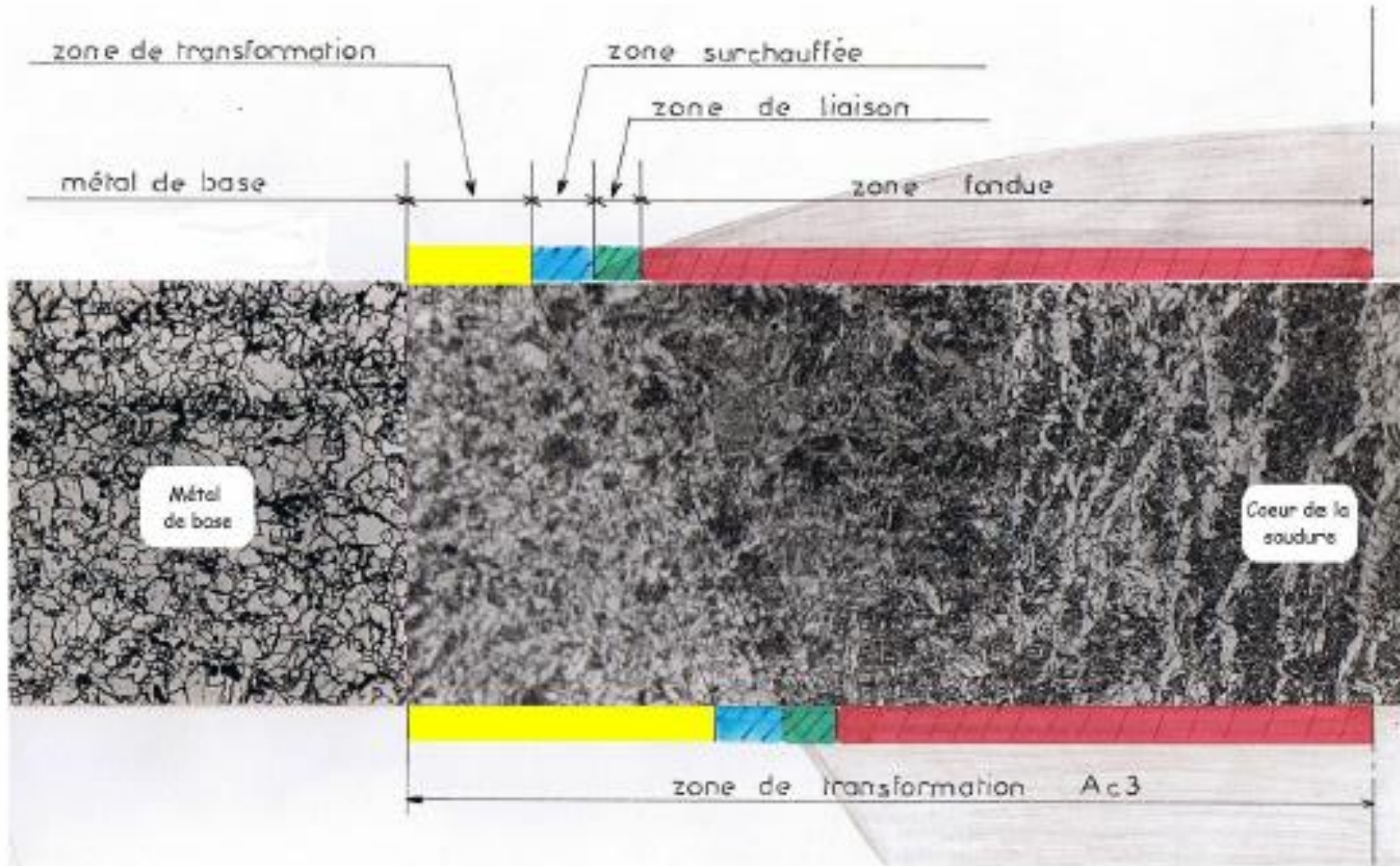
➤ Zone affectée thermiquement ZAT:



- ➔ Zone1: Région où le métal n'a pas atteint une température d'environ 600°C
- ➔ Zone2: Entre 600°C et AC_1 : Quelques modifications apparaissent
- ➔ Zone3: Entre AC_1 et AC_3 : L'austénisation partielle génère une structure à grains fins
- ➔ Zone4: Entre AC_3 et 1200°C: Structure à grains grossiers
- ➔ Zone5: Au-delà de 1200°C: Structure aciculaire grossière ou structure de trempe (Zone de forte trempabilité)

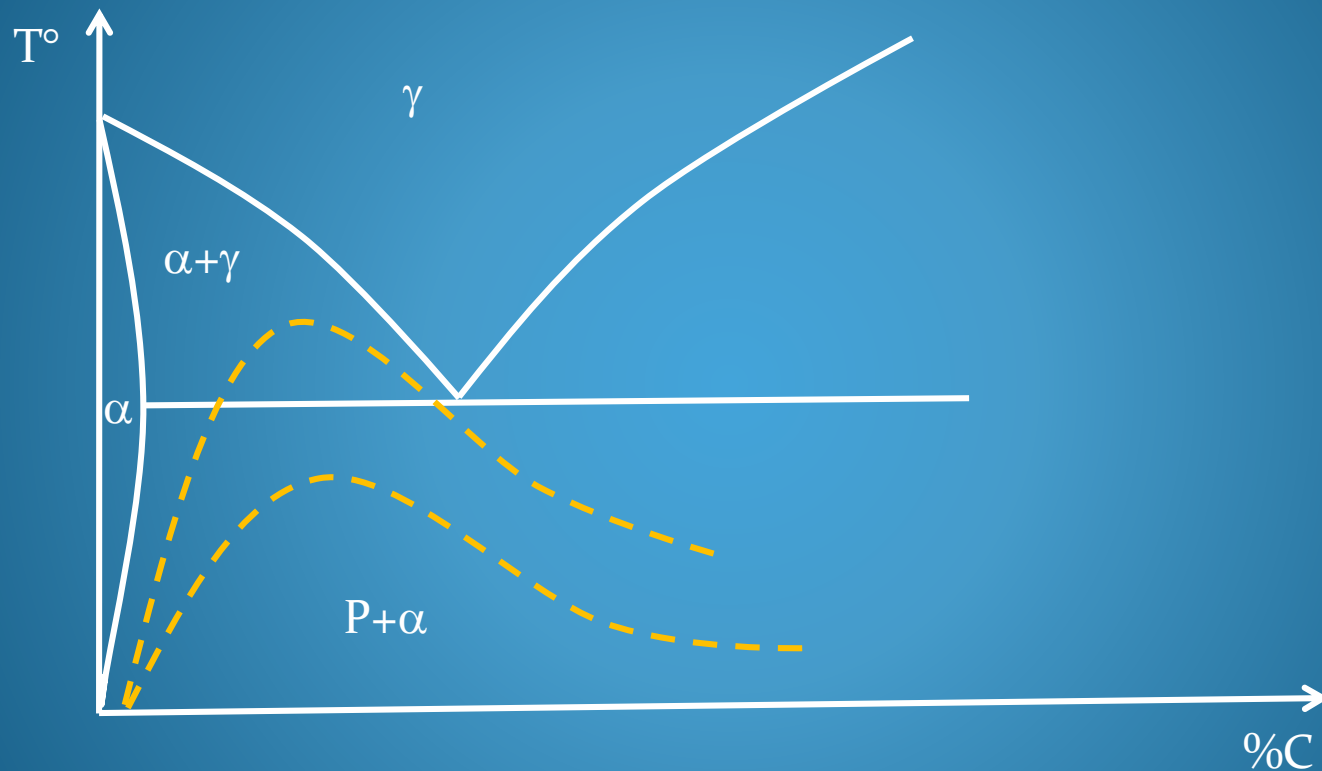
Aspects métallurgiques

Micrographie transversale
d'un cordon de soudure



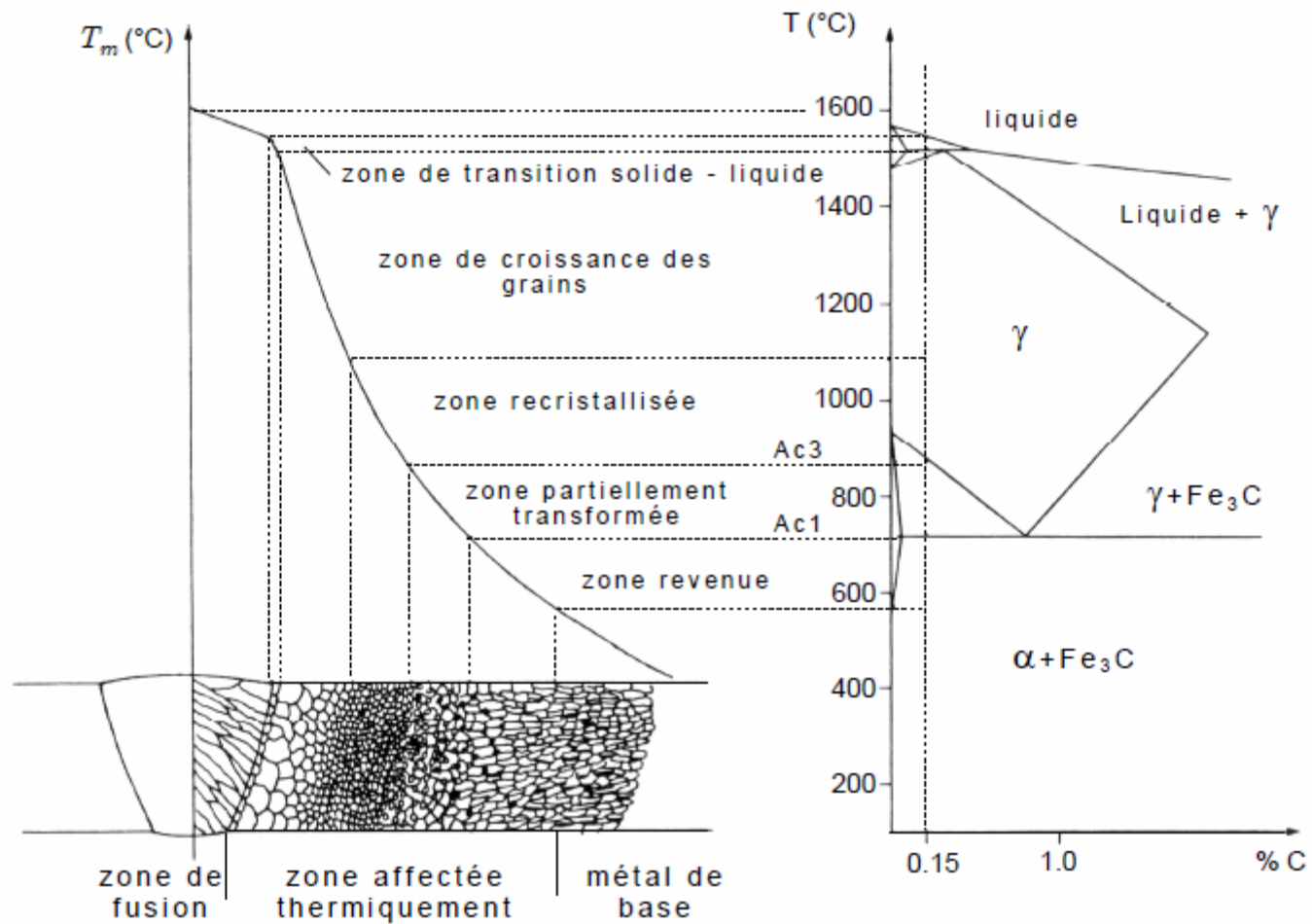
Aspects métallurgiques

➤ Structure de ZAT:

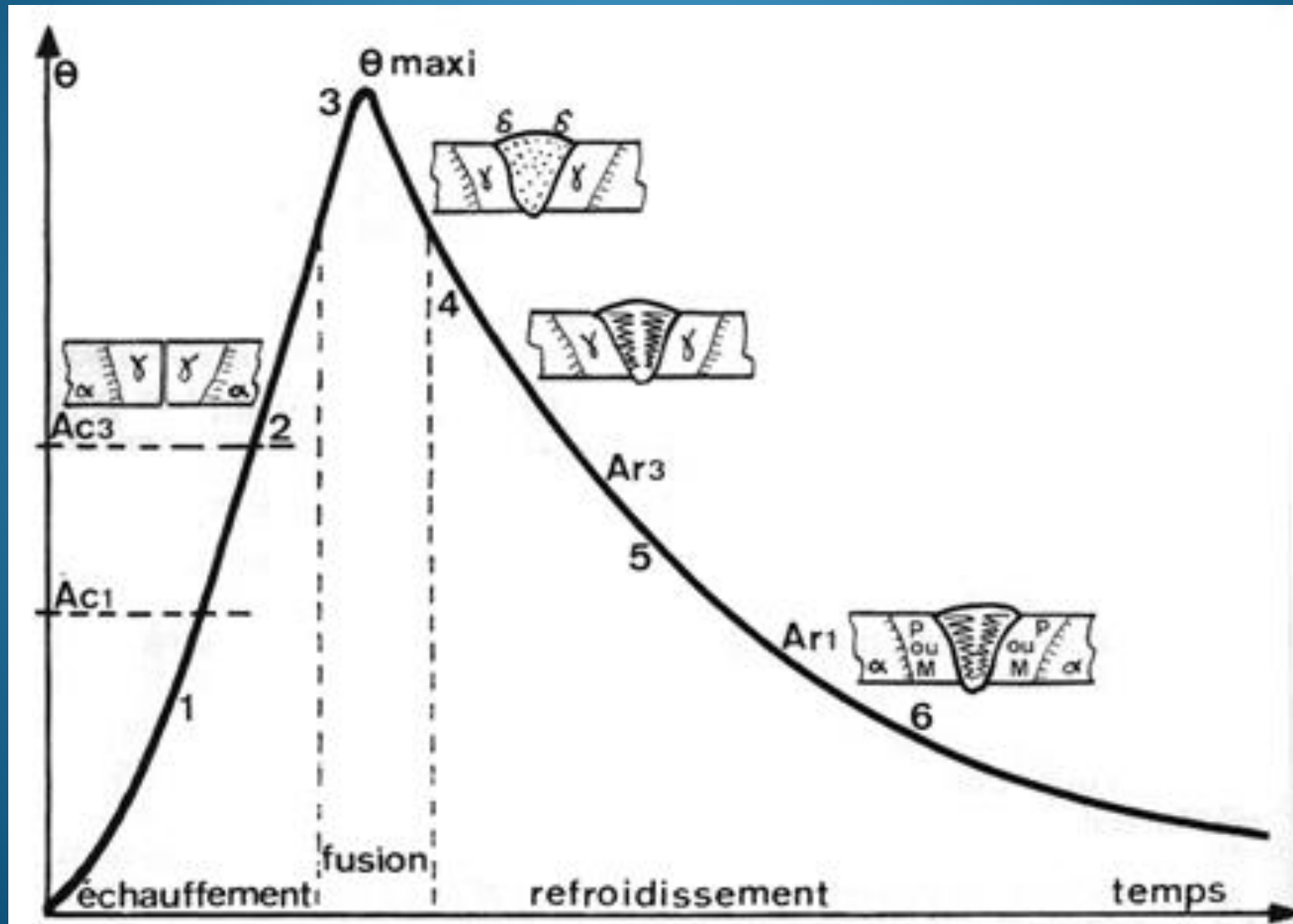


➔ Les structures finales dépendent du cycle thermique du point considéré ($T_{\max}$ et vitesse de refroidissement)

Aspects métallurgiques



Aspects métallurgiques

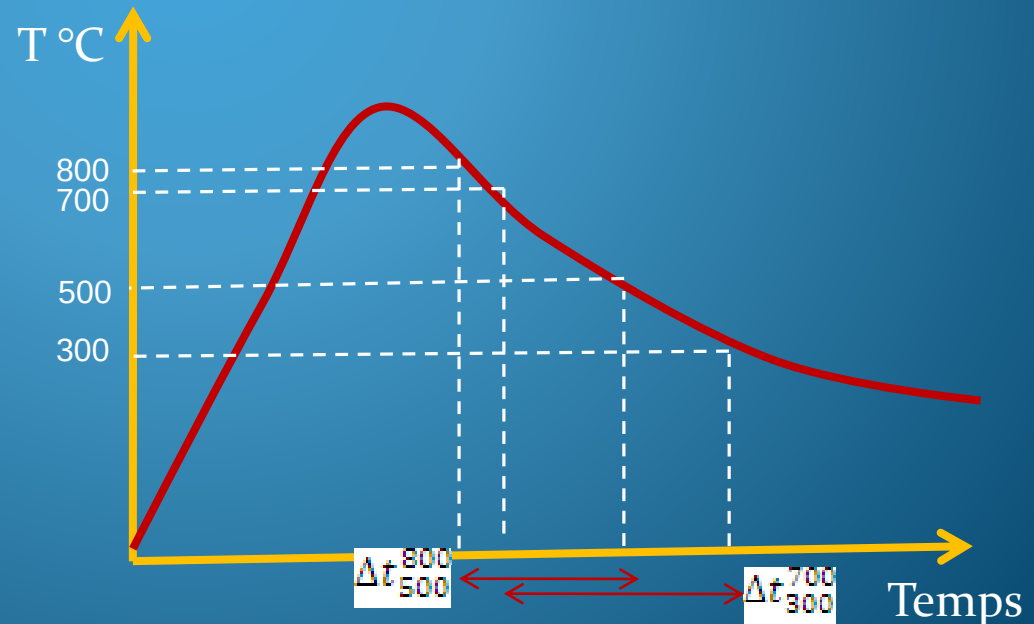


Notes sur les diagrammes de transformations au refroidissement

- ➡ Lors des cycles thermiques de soudage, la durée d'austénisation $\Delta t \approx 0$ (Très faible)
 - ⇒ Les diagrammes TRC établis pour les traitements thermique ne sont plus valables
 - ⇒ Etablissement des diagrammes équivalents en conditions de soudage (**TRCS**)
- ➡ Diagrammes établis en fonction des paramètres de refroidissement
- ➡ On distingue:

➤ $\Delta t_{800/500}$ (IS et IRSID)

➤ $\Delta t_{700/300}$ (IRSID)



Note sur les diagrammes de transformations au refroidissement

☞ Détermination de $\Delta(500-800)$

➔ La détermination du paramètre $\Delta(500-800)$ peut se faire selon:

- Modèles théoriques tenant compte du procédé et des caractéristiques spécifiques du matériau
- Abaques expérimentaux:
 - Abaques établis en fonction de:
 - ✓ La température initiale
 - ✓ L'épaisseur
 - ✓ Le procédé
 - Par le suivi de $\Delta(500-800)$, on peut alors établir pour un matériau donné:
 - ✓ Un diagramme TRCS ($T^{\circ}=f(\Delta(500-800))$)
 - ✓ Un diagramme Dureté ($Hv=f(\Delta(500-800))$)

➔ But: Déterminer la composition structurale et les propriétés mécaniques du matériau après soudage

Note sur les diagrammes de transformations au refroidissement

☛ Détermination de $\Delta(500-800)$

➔ Méthode utilisant un modèle mathématique

➤ Tôles épaisses ($e > 25\text{mm}$) :

$$\Delta t_{500}^{800} = E_d \frac{1}{2\pi a} \left(\frac{1}{(P_c)_f (500 - \theta_0)} - \frac{1}{(P_c)_d (800 - \theta_0)} \right)$$

➤ Tôles minces ($e \leq 20\text{mm}$) :

$$\Delta t_{500}^{300} = \left(\frac{E_d}{e'} \right)^2 \frac{1}{4\pi a} \left(\left(\frac{1}{(P_c)_f (500 - \theta_0)} \right)^2 - \left(\frac{1}{(P_c)_d (300 - \theta_0)} \right)^2 \right)$$

a = Coefficient de diffusivité thermique (pour les aciers courants $a \sim 0.054$)

$(P_c)_d$ = capacité calorifique en début de transformation à 800°C

$(P_c)_f$ = capacité calorifique en fin de transformation (à 500°C).

θ_0 = Température initiale

E_d = Energie dissipée telle que: $E_d = \frac{UV}{v} \eta$

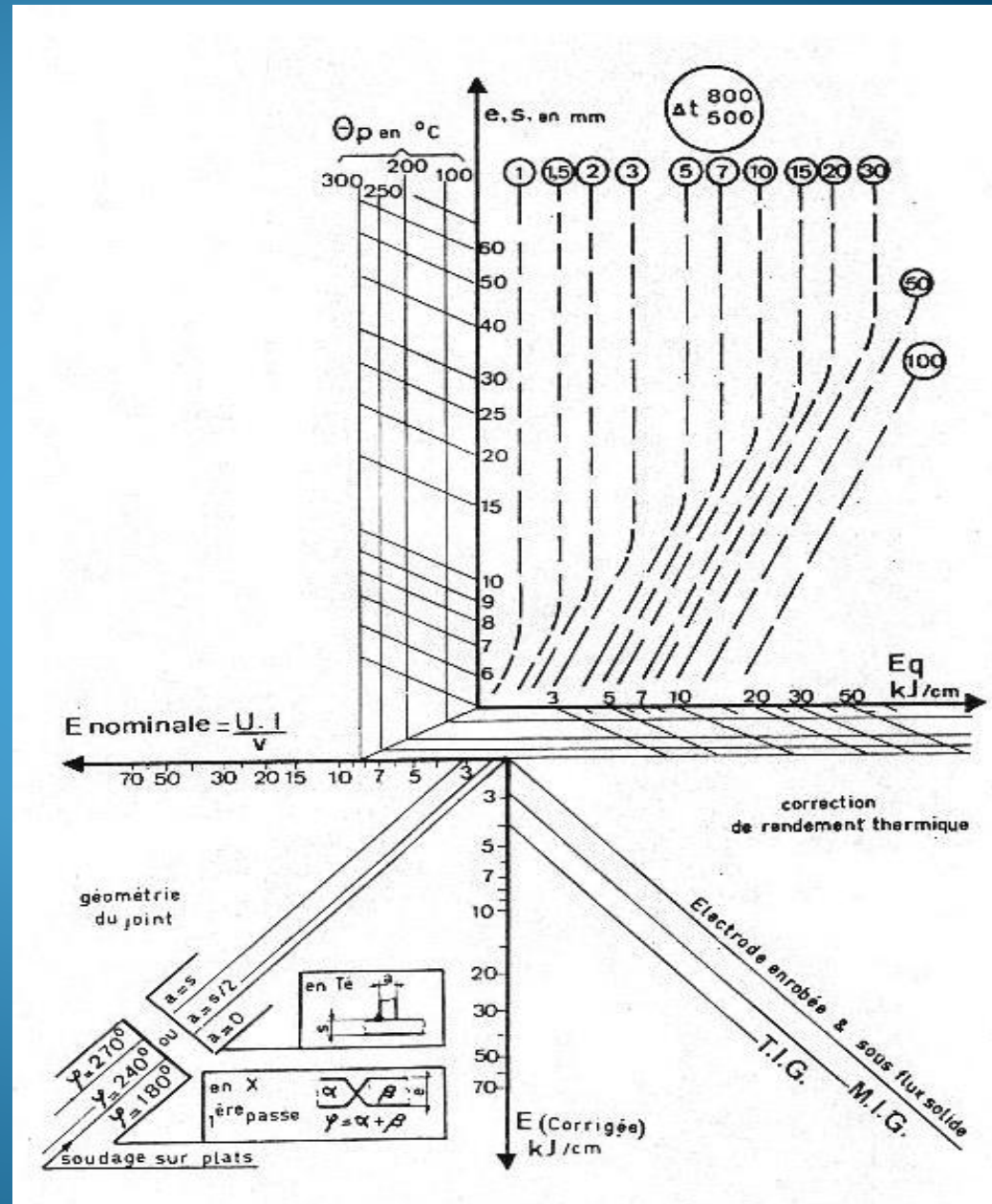
e = épaisseur combinée

Note sur les diagrammes de transformations au refroidissement

➡ Détermination de $\Delta(500-800)$

➡ Méthodes utilisant des abaques expérimentaux:

➡ Exemples:



Soudabilité métallurgique

☛ Méthode BWRA (Bristich Welding Ressearch Association)

➔ Elle tient compte de:

- Indice de soudabilité défini par le carbone équivalent, la nature et le diamètre de l'électrode
- Indice de sévérité thermique (Thermal Severity Number) défini par l'épaisseur des pièces et la forme de l'assemblage suivant leur disposition

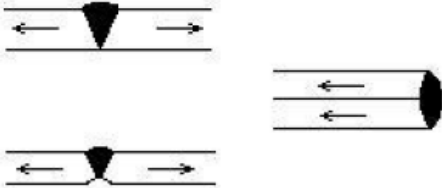
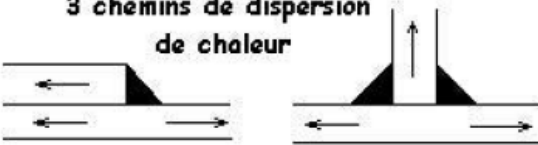
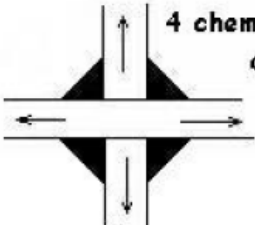
➔ L'indice TSN est donné par:

$$\text{TSN} = \frac{\text{Épaisseur moyenne des tôles} \times \text{le nombre de voies de dispersion}}{6}$$

➔ 6 étant pris comme unité d'épaisseur

Soudabilité métallurgique

➤ Détermination de l'indice de sévérité thermique (TSN):

Type de joint	Epaisseur des tôles en mm	TSN
 2 chemins de dispersion de chaleur	6 et 6	2
	6 et 12	3
	6 et 18	4
	12 et 12	4
	24 et 24	8
	24 et 48	12
 3 chemins de dispersion de chaleur	6 et 6	3
	12 et 12	6
	24 et 24	12
 4 chemins de dispersion de chaleur	6 et 6	4
	12 et 12	8
	24 et 24	16
	6 - 12 - 12 - 12	7

Soudabilité métallurgique

→ Avec un carbone équivalent donné par:

$$[C] = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{10}$$

→ L'indice de soudabilité des aciers est donnée sur le tableau suivant:

Carbone équivalent		Lettres définissant l'indice de soudabilité
Avec une électrode rutile	Avec une électrode basique	
0,20	0,25	A
0,21 à 0,23	0,26 à 0,30	B
0,24 à 0,27	0,31 à 0,35	C
0,28 à 0,32	0,36 à 0,40	D
0,33 à 0,38	0,41 à 0,45	E
0,39 à 0,45	0,46 à 0,50	F
> à 0,45	> à 0,50	G

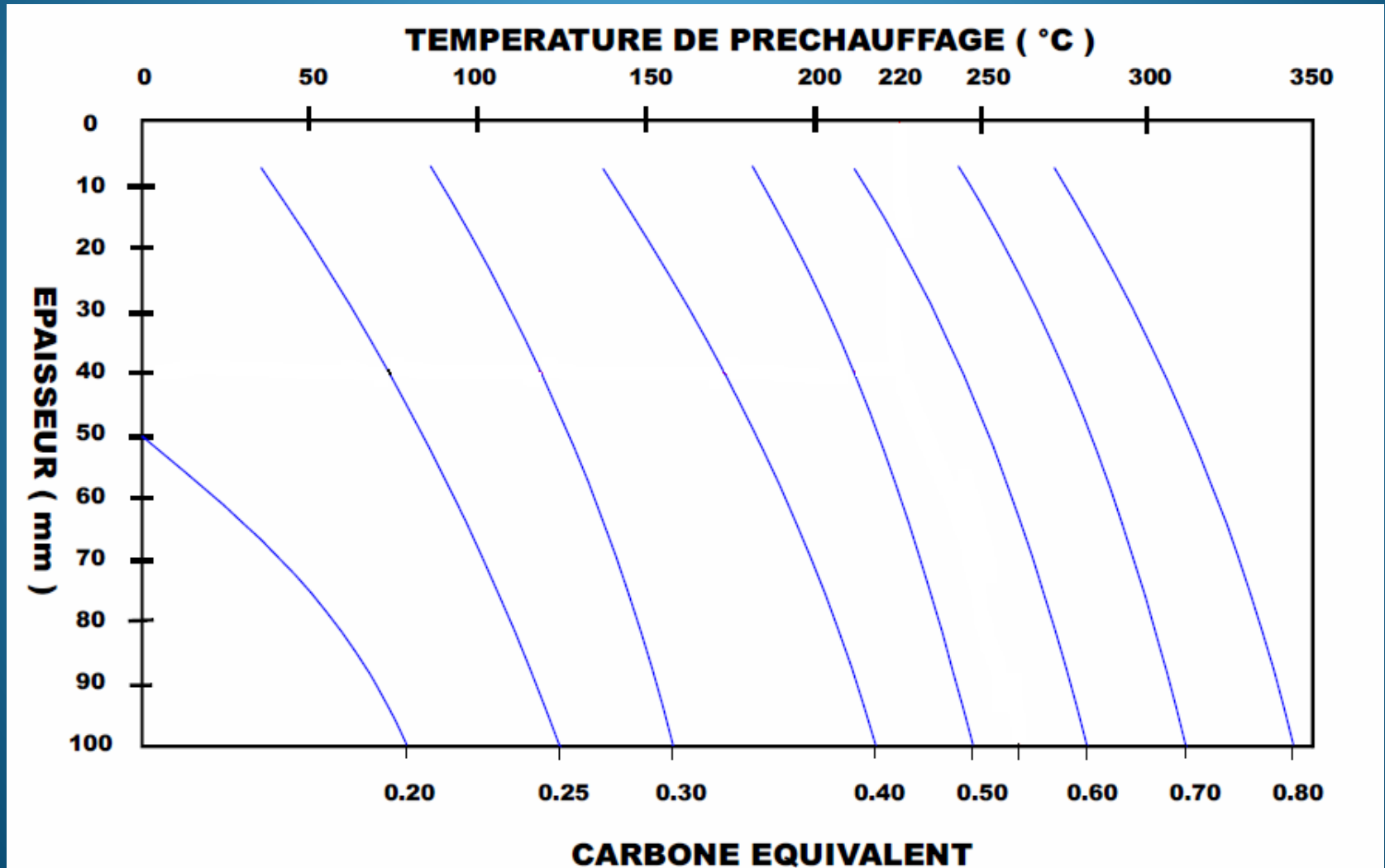
Soudabilité métallurgique des aciers

👉 Tableau des préchauffages:

Chiffre de sévérité thermique TSN	Indice de soudabilité	Température minimale à laquelle doit être exécuter la soudure				
		Diamètre de l'électrode				
		3,2	4	5	6	8
TSN 2	D					
	E	50				
	F	125	25			
TSN 3	C	0				
	D	75				
	E	100	25			
	F	150	100	25		
TSN 4	B	25				
	C	50				
	D	100	25			
	E	125	75			
TSN 6	F	175	125	75		
	A	25				
	B	50				
	C	100	25			
	D	150	100	25		
	E	175	125	75	25	
TSN 8	F	225	175	125	75	
	A	25				
	B	75				
	C	125	75	25		
	D	175	125	75		
	E	200	150	125	50	25
TSN 12	F	225	200	175	125	50
	A	75	25			
	B	125	75	25		
	C	150	125	75		
	D	200	175	125	75	
	E	225	200	175	100	50
TSN 16	F	250	225	200	150	125
	A	75	25	25		
	B	125	75	50	25	
	C	175	150	125	50	
	D	200	175	175	125	50
	E	225	200	200	150	100
TSN 24	F	250	250	225	200	150
	A	75	25	25		
	B	125	75	50	25	
	C	175	150	125	75	
	D	200	175	175	125	
	E	225	200	200	175	
TSN 24	F	250	250	225	200	

Soudabilité métallurgique des aciers

- ➔ Diagramme de SEFERIAN
- ➔ Diagramme de détermination des températures de préchauffage des aciers au carbone et faiblement alliés



Soudabilité métallurgique

→ Si **S** représente le coefficient de soudabilité, on a:

pour les aciers au carbone et faiblement alliés.

PARFAITEMENT SOUDABLE

$C = 0 \text{ à } 0,25 \%$

$S \text{ } 9 \text{ à } 10$

MOYENNEMENT SOUDABLE

$C = 0,25 \text{ à } 0,45 \%$

$S \text{ } 7 \text{ à } 9$

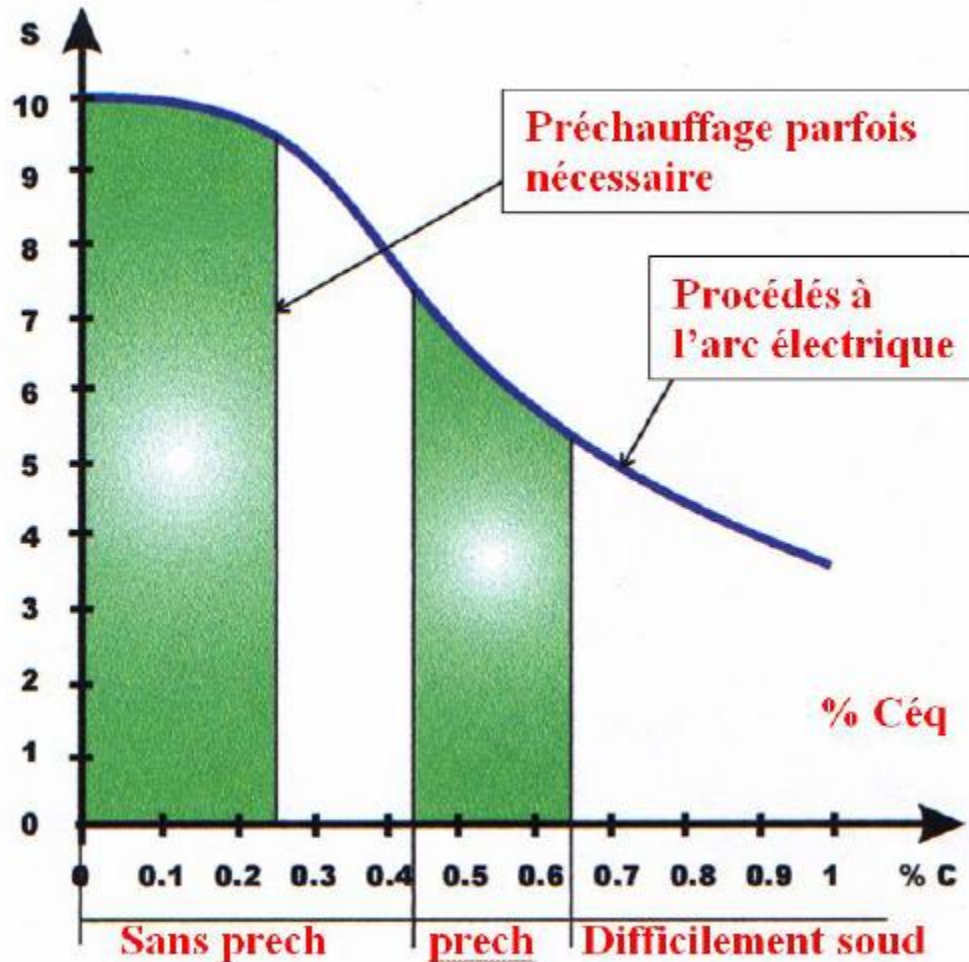
SOUDABLE AVEC PRECHAUFFAGE

$C = 0,45 \text{ à } 0,65 \%$

$S \text{ } 5 \text{ à } 7$

SOUDAGE DIFFICILE

Soudage sous conditions (préchauffage) indispensable
 $S < 5$



Soudabilité métallurgique des aciers

Exemple de calcul : soit à assembler 2 tôles d'acier (35 Cr Mo 4) épaisseur 10mm bout à bout avec une électrode basique de Ø 3,2.

rappel de la formule :

$$CE = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{10}$$

1) Détermination du CE : 35 Cr Mo 4

Carbone (C) : 0,35%

Chrome (Cr) : 1%

Molybdène (Mo) : 0,30%

$$\text{Carbone équivalent (CE)} = 0,35 + \left(\frac{1 + 0,30}{10} \right) = 0,48\%$$

2) Détermination de l'indice de soudabilité

Electrode : Ø 3,2

Lettre : F

3) Détermination du chiffre de sévérité thermique :

Type d'assemblage : bout à bout 2 chemins de dispersion de chaleur

Epaisseur des tôles : 10mm

TSN = 3,33 donc : 3

4) Détermination de la température de préchauffage :

TSN = 3

Indice : F

Température de préchauffage = 150°

Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

➔ En général, on distingue deux types de fissures:

- Fissures à chaud
- Fissures à froid

◆ Fissures à chaud:

- ➔ Elles se forment sous l'effet du retrait lors du refroidissement
- ➔ Elles sont dues en général à l'association de plusieurs facteurs tels que:
 - Ségrégations
 - Présence de S et P (Affaiblissement des propriétés mécaniques
 - Sévérité des cycles thermiques
 - Propriétés mécaniques du métal d'apport
 - Degré de bridage
 - Contraintes résiduelles dans ZAT
 - Volume du bain de fusion

Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

◆ Fissures à chaud:

➔ Exemple:



➔ Trois causes principales peuvent être distinguées:

- Composition chimique
- Forme du cordon.
- Contraintes appliquées lors de la solidification

Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

◆ Fissures à chaud:

➤ Composition chimique:

➔ Formules empiriques:

➔ **UCS**: Unit of Crack Susceptibility

$$\text{UCS} = 230.C^* + 190\%.S + 75\%.P + 45\%.Nb - 12.3\%.Si - 5.4\%.Mn - 1$$

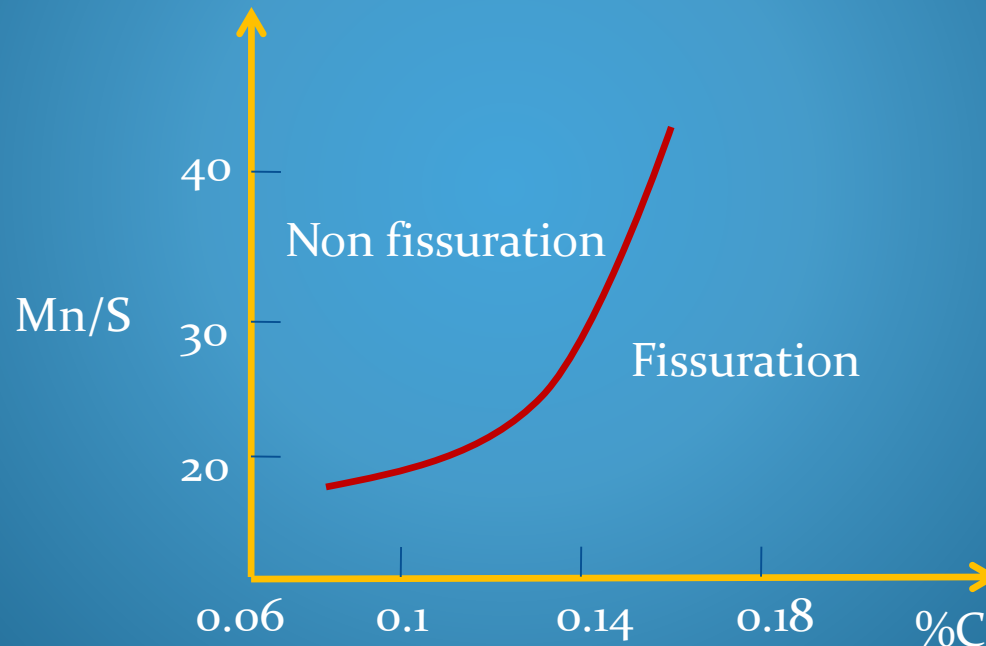
Si %C < 0.08%, Prendre C* = 0.08%

➔ Sensibilité à chaud si:

- **UCS > 19** pour les joints en T
- **UCS > 25** pour les joints bout à bout

Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

- La cause souvent rencontrée : Ségrégation des sulfures
- En général, on peut éviter de telles fissures par l'ajout du Mn:



- Prévention:
 - Mn/S adéquat
 - Réduction de S, P, C et Nb au minimum

Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

- ➔ Plus le %C est élevé $\Rightarrow$ Mn/S élevé
- ➔ Phénomènes de fissuration complexes:
 - Les fissures à chaud causées par les films d'impuretés dans le liquide (T_f faible)
 - Lors du soudage des aciers faiblement alliés
 - $\Rightarrow$ %C doit être $<0.1\%$
 - Si l'alliage se solidifie sous forme de « δ » $\Rightarrow$ Réaction péritectique
 - ▶ Comme les sulfures sont dissouts dans « δ » et non dans « γ »
 - $\Rightarrow$ γ rejette les sulfures formés dans les joints
 - $\Rightarrow$ D'où formation d'un film intergranulaire de T_f faible
 - $\Rightarrow$ Fissuration à chaud

Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

➤ Forme du cordon:

- Maintenir un rapport de largeur du cordon sur sa hauteur tel que:
$$l / h \geq 0.7$$
- Cordon de forme convexe plutôt que concave.
- Chanfreinage adéquat

➤ Contraintes appliquées lors de la solidification:

- L'augmentation de l'épaisseur de la tôle et une limite élastique trop élevée favorisent les contraintes.
- Des pièces bridées par géométrie de l'assemblage ou maintien en position trop rigide durant le soudage.

Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

◆ Fissures à froid:

- Défauts les plus redoutés dans les joints soudés
- Apparaissent généralement dans ZAT



→ 3 causes principales:

- Structure fragile dans ZAT
- Présence de H_2 dans ZF et la ZAT
- État de contraintes

Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

- Structure fragile dans ZAT:

- Si le cycle thermique sévère $\Rightarrow$ apparition de la martensite
 $\Rightarrow$ Contraintes résiduelles
d'où: **Fissuration**

- Prévention:

Contraintes résiduelles très faible (TT) ou $\Delta t(500-800)$ suffisante pour l'obtention d'une structure favorable

- Exemple: Courbe HV- $\Delta t(500-800)$

$$HV_c = 240 + (790 \cdot \%C)$$

- $\Rightarrow$ Utilisation du diagramme pour déterminer $\Delta t(500-800)$ limite

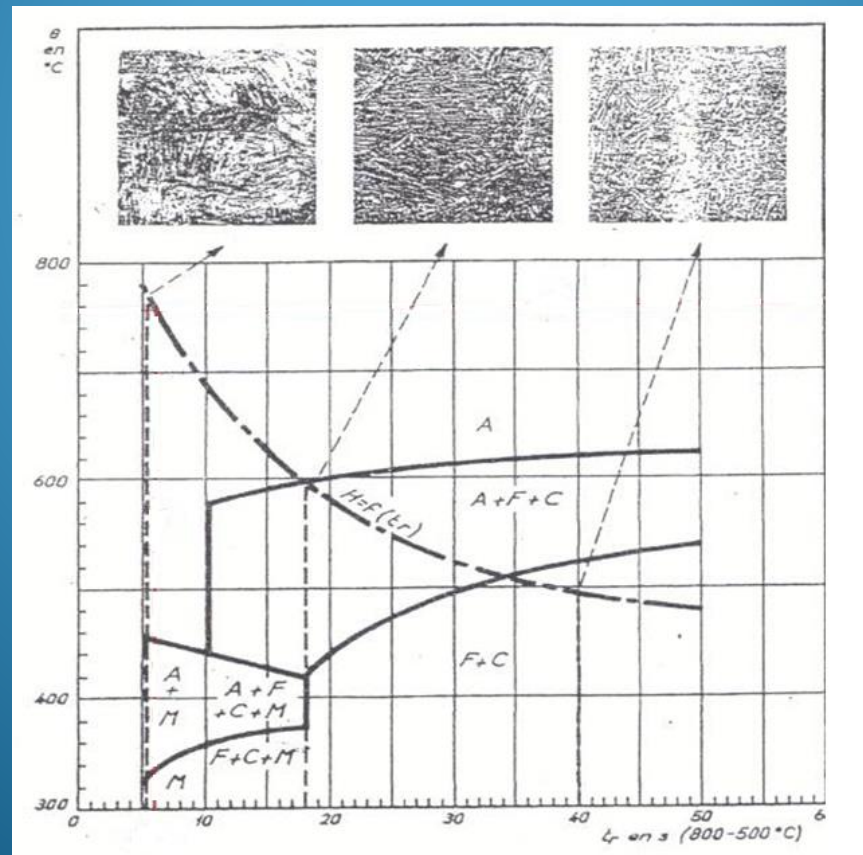
- Pour E36: $\%C \approx 0.2 \quad \Rightarrow HV_c < 398 \quad \Rightarrow \Delta t(500-800) > 6.5 \text{sec}$

Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

- Structure fragile dans ZAT:

➔ Exemple de diagramme TRCS d'un acier de composition:

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	V
0.14	1.41	0.36	0.06	0.15	0.05		0.08

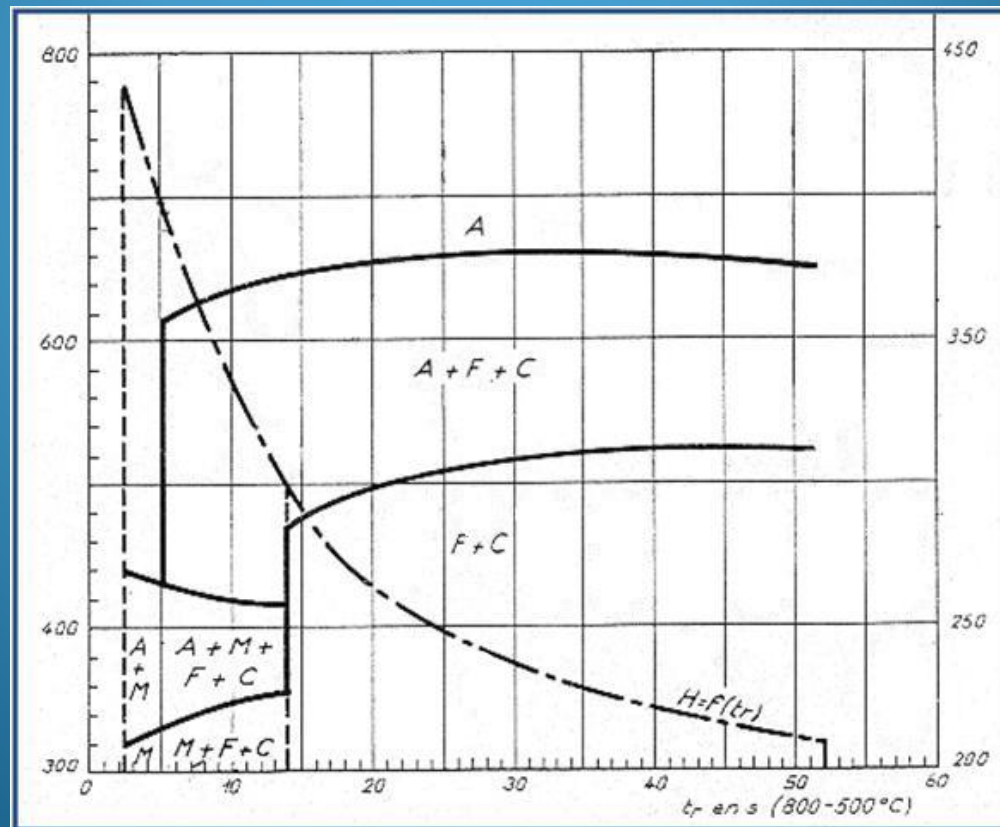


Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

- Structure fragile dans ZAT:

➔ Exemple de diagramme TRCS d'un acier de composition:

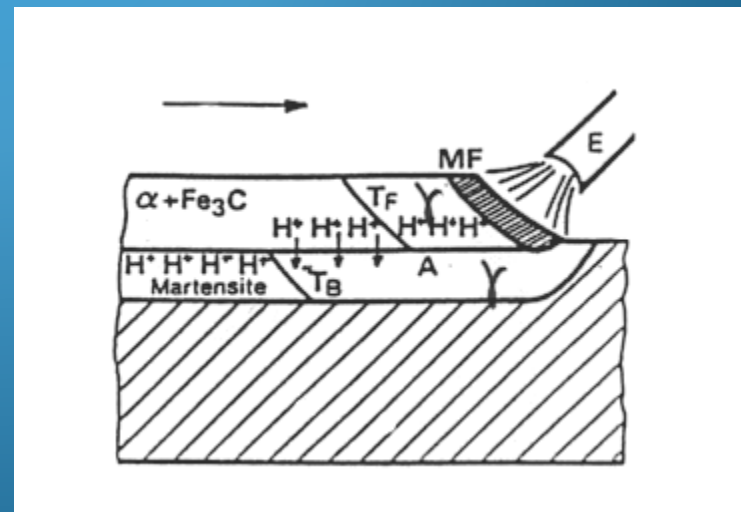
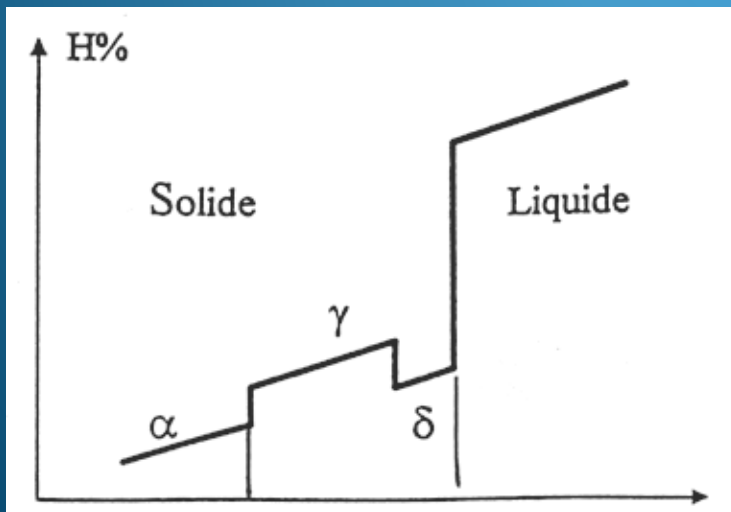
	C	Mn	Si	Al	S	P
S355 JO	0.17	1.4	0.45	0.063	0.026	0.027



Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

● Présence de H_2 dans la ZF et la ZAT:

- ➔ H_2 peut provenir de:
 - Humidité
 - H_2O dans l'enrobage
 - Huile, graisse, peinture,...etc
- ➔ Dans les réseaux cristallins du Fer γ et α , les atomes de H_2 forment des solutions solides d'insertion.
- ➔ La solubilité de H_2 varie en fonction de la température



Phénomènes de fissuration dans les assemblages soudés

- Présence de H₂ dans la ZF et la ZAT:

- ➔ La différence de solubilité de H₂ dans γ et α
 - ⇒ Migration de H₂ vers les zones qui restent austénitiques
 - ⇒ Concentration de H dans les réseaux
 - ➔ D'où risque de fissuration

- État de contraintes:

- ➔ Sous l'effet des contraintes en service et des contraintes résiduelles dans ZAT
 - ⇒ Microfissuration par décohésion du métal

PREVENTION DES DEFORMATIONS ET DE FISSURATION

☛ Exemples de préventions:

◆ Déformation préalable:

➔ **Exemples:** Avant



Après

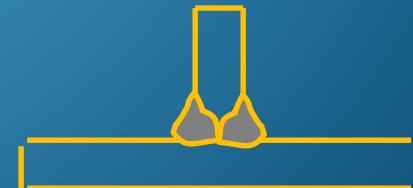
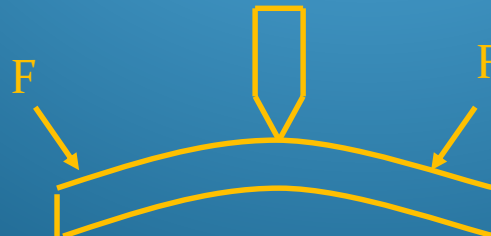


➔ **Solutions:**

- Contre position avant soudage:

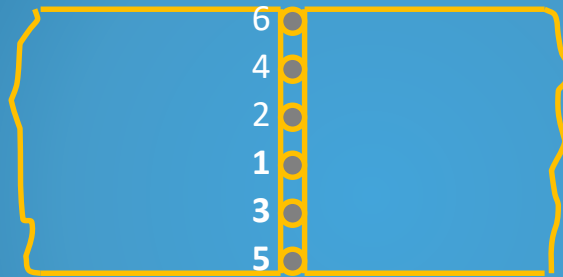


- Pré-déformation:



PREVENTION DES DEFORMATIONS ET DE FISSURATION

◆ Pointage:



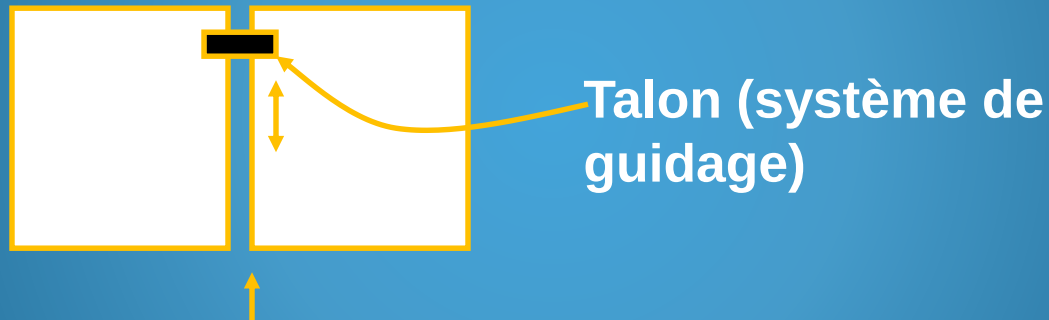
➔ Espacement des points : $20.e$ si $e > 5\text{mm}$

$30.e$ si $e \leq 5\text{mm}$

e = épaisseur de la pièce

PREVENTION DES DEFORMATIONS ET DE FISSURATION

◆ Utilisation d'un talon:



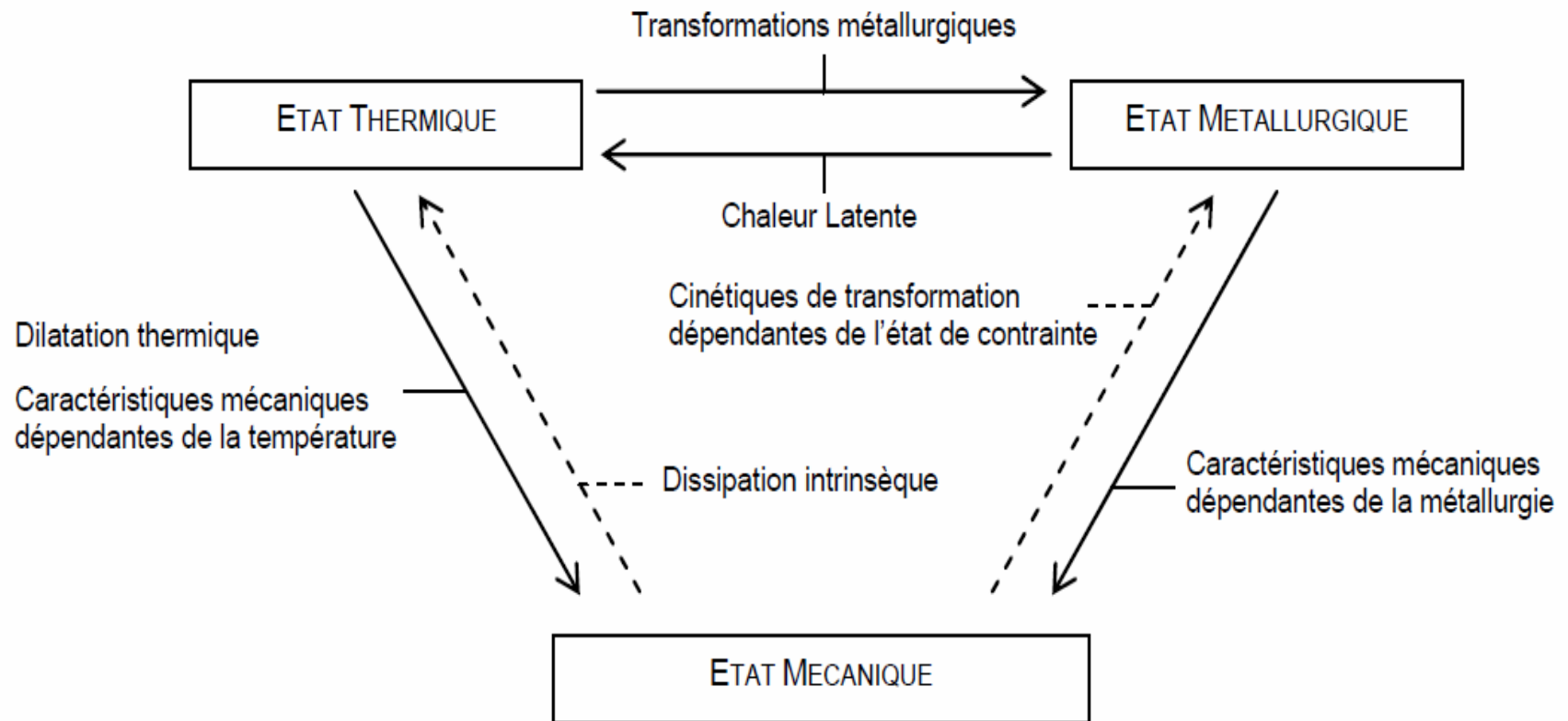
◆ Préchauffage:

Le préchauffage est appliqué localement ou sur l'ensemble de la pièce

PREVENTION DES DEFORMATIONS ET DE FISSURATION

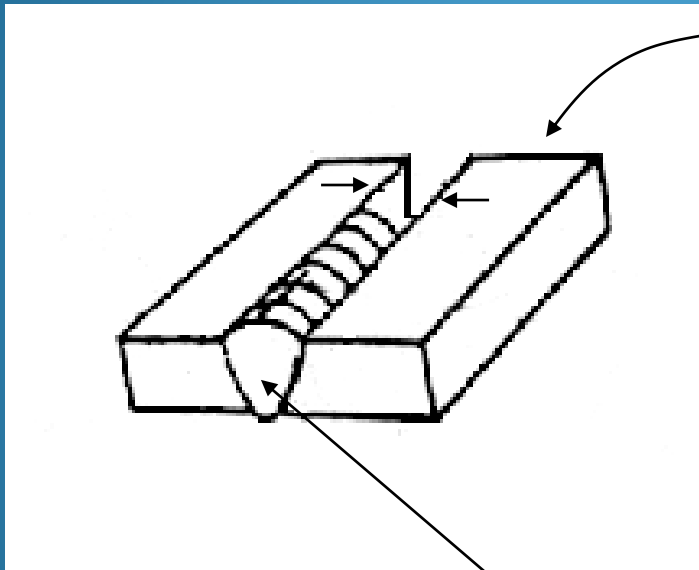
- ◆ Choix du procédé: Choix de l'apport thermique et de la vitesse d'avancement de la source de chaleur
- ◆ Chauffage antagoniste: Chauffage local appliqué sur une portion de la pièce opposée à celle que l'on assemble
But : annuler les retraits du soudage
- ◆ Choix de l'ordre d'exécution des soudures

Interactions entre les états thermiques, métallurgiques et mécaniques



**MERCI DE VOTRE
ATTENTION**

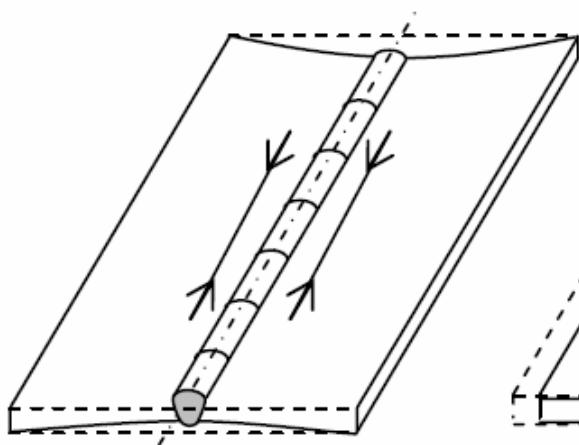
PREVENTION DES DEFORMATIONS ET DE FISSURATION



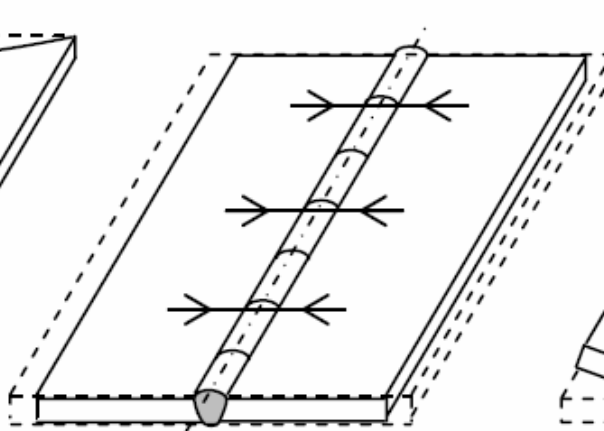
Rapprochement
provoqué au cours du
soudage

Contraction du métal lors
de la solidification

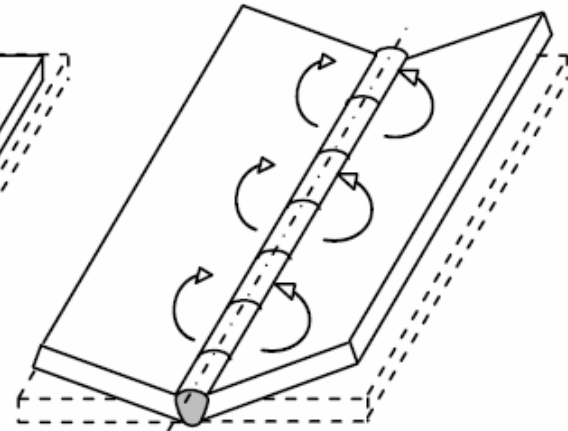
PREVENTION DES DEFORMATIONS ET DE FISSURATION



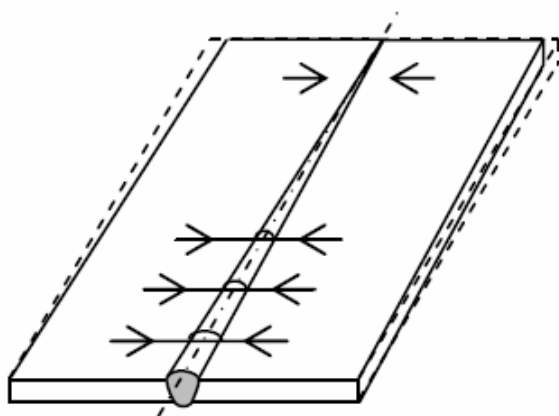
(a) retrait longitudinal



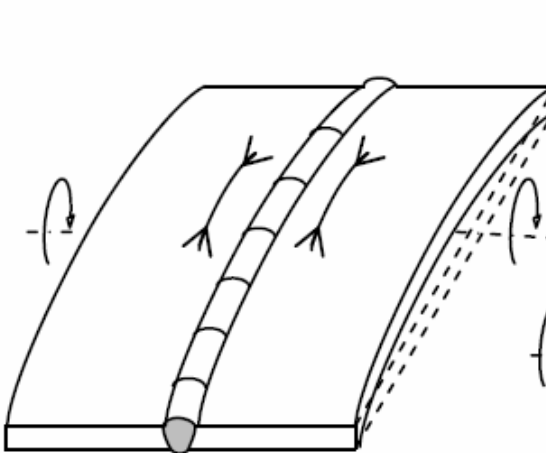
(b) retrait transversal



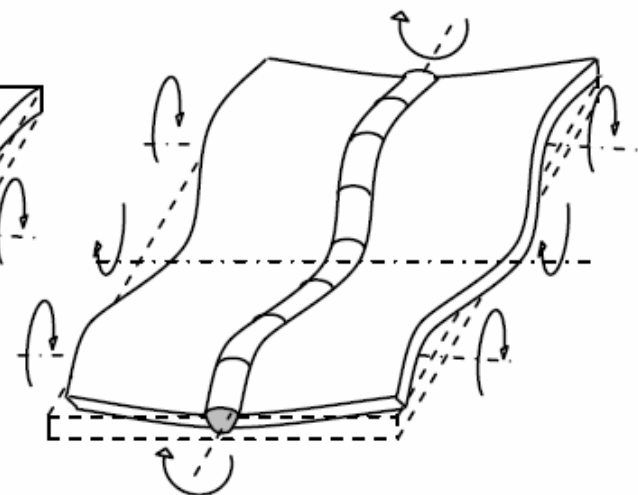
(c) effet de pliage



(d) effet de serrage



(e) effet de cintrage

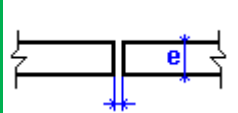
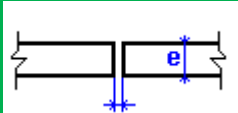
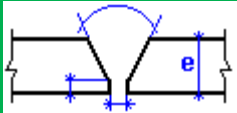
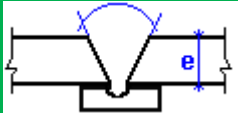


(f) flambage

Exemples de choix des intensités de soudage

Intensité moyenne de soudage pour la position à plat						
Epaisseur	Ø 1,6 mm	Ø 2,0 mm	Ø 2,5 mm	Ø 3,2 mm	Ø 4,0 mm	Ø 5,0 mm
3 mm		60 A	70 A	90 A		
4 mm			80 A	100 A	120 A	
5 mm			90 A	110 A	130 A	160 A
6 mm			90 A	120 A	140 A	160 A
8 mm			90 A	125 A	150 A	170 A
10 mm				130 A	160 A	190 A

Exemples de choix des intensités de soudage

QUELQUES PRÉPARATIONS DE JOINTS			
Epaisseur en mm	Fourchette d'intensité	Ø électrode	Préparation
De 1,0 à 2,5 mm	30 à 60 ampères	Ø 1,6 mm	
De 2,0 à 4,0 mm	50 à 90 ampères	Ø 2,0 à 3,2 mm	
De 4,0 à 20 mm	60 à 200 ampères	Ø 2,5 à 5,0 mm	
De 4,0 à 20 mm	70 à 200 ampères	Ø 2,5 à 5,0 mm	
De 8,0 à 30 mm	80 à 200 ampères	Ø 3,2 à 5,0 mm	